

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Sistema para el manejo de datos
climáticos de pequeñas
producciones agrícolas bajo
invernadero: un acercamiento a la
agricultura inteligente**

Jorge Arcenio Quintero Pulgar

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá, Colombia
2021

Sistema para el manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero: un acercamiento a la agricultura inteligente

Jorge Arcenio Quintero Pulgar

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería de Sistemas

Director (a):

PhD., Fabio Rodrigo Leiva

Línea de Investigación:

Geoinformación para el uso sostenible de los recursos naturales

Ingeniería de software

Grupo de Investigación:

Desarrollo sostenible y gestión ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2021

*A mis hermanas Yudy y Luisa, quienes me
alentaron a tomar la decisión de iniciar mis
estudios de posgrado*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Jorge Arcenio Quintero Pulgar

Nombre

Fecha 15/10/2021

Agradecimientos

La finalización de este trabajo final se debe a la suma de mis esfuerzos y el apoyo de varias personas sin las cuales no hubiera sido posible finalizarlo. Agradezco a mi familia por el apoyo y motivación constante; al profesor Fabio Leiva quien es mi director, a las personas que me permitieron usar el invernadero los señores Dario y Alexis, a mis compañeros de Universidad que me orientaron y me ayudaron a resolver diversos problemas que se presentaron durante mi carrera, y a mis amigos que de vez en cuando preguntaban por mi avance de mi carrera de maestría y su apoyo moral cuando les contaba de los inconvenientes presentados.

Resumen

Sistema para el manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero: un acercamiento a la Agricultura Inteligente

Debido al aumento de la población mundial, para el año 2050 se requiere incrementar la producción de alimentos. Una manera para lograrlo es mediante Granjas Inteligentes que produzcan alimentos nutritivos y de calidad, optimizando el uso de los recursos disponibles.

El desarrollo de este proyecto tuvo como objetivo general construir un prototipo de sistema que permita el manejo de datos climáticos en pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero. Los objetivos específicos fueron: i) diseñar un sistema para el manejo de datos climáticos usando tecnologías y dispositivos de bajo costo; ii) construir e integrar los componentes del sistema; iii) validar el sistema en el sitio seleccionado.

El diseño del sistema de manejo de datos climáticos se realizó tomando como base una arquitectura para la construcción de granjas inteligentes compuesta de cuatro capas; esta arquitectura fue propuesta inicialmente por investigadores de la Universidad de Macedonia. En la construcción de los componentes se destaca el despliegue de una red inalámbrica de sensores, el uso de la Firebase Realtime Database y el desarrollo de una aplicación Web y una móvil, que obtienen la información de la base de datos por medio de servicios web RESTful.

El funcionamiento del sistema fue validado en un invernadero de tomate (*Solanum lycopersicum*) en Ubaque (Cundinamarca), y contó con la asistencia y colaboración del productor. Para esto, se montó el sistema en condición de campo y se tomaron medidas de las variables climáticas temperatura, humedad relativa y humedad del suelo.

Como resultado principal se tiene un prototipo de bajo costo (COP 650,000) para el manejo de datos climáticos que se ajusta a pequeñas producciones de tomate bajo invernadero. Se concluye que la implementación de NodeMcu, Arduino, sensores compatibles con Arduino, y Firebase facilitan considerablemente el desarrollo de este tipo de sistemas y pueden considerarse como pasos iniciales para avanzar hacia granjas inteligentes.

Palabras clave: Granjas Inteligentes, Cultivo de tomate, Redes de Sensores Inalámbricas, APIs Web, Aplicaciones móviles.

Abstract

Climate data management system for small-scale greenhouse farming: an approach to Smart Farming

Due to the increase in world population, by the year 2050 food production will need to be increased. One way to achieve this is through smart farms that produce nutritious and quality food, optimizing the use of available resources.

The general objective of this project was to design and build a system prototype that allows the management of climate data in small agricultural productions under greenhouses. The specific objectives were: i) to design a system for climate data management using low-cost technologies and devices; ii) to build and integrate the system components; iii) to validate the system at the selected site.

The design of the climate data management system was based on an architecture for the construction of smart farms composed of four layers; this architecture was initially proposed by researchers at the University of Macedonia. In the construction of the components, it is important to highlight the deployment of a wireless sensor network, the use of the Firebase Realtime Database and the development of a Web application and a mobile application, which obtain information from the database through RESTful web services.

The new system was validated in a tomato crop (*Solanum lycopersicum*) under greenhouse in Ubaque (Cundinamarca), with the assistance and collaboration of the grower. For this purpose, the system was set up in field conditions and measurements were taken of the variables temperature, relative humidity and soil moisture.

The main result is a low-cost prototype (COP 650,000) for the management of climate data that is suitable for small greenhouse tomato production. It is concluded that the implementation of NodeMcu, Arduino, Arduino compatible sensors, and Firebase facilitate considerably the development of this type of systems and can be considered as initial steps to advance towards smart farms.

Keywords: Smart Farm, Tomato crop, Wireless Sensor Network, APIs Web, Mobile Apps

Este Trabajo Final de maestría fue calificado en diciembre de 2021 por el siguiente
evaluador:

Félix Antonio Cortés Aldana PhD.
Profesor Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia

Contenido

	Pág.
Resumen	6
Lista de figuras	11
Lista de tablas	12
Introducción	13
1. Marco Teórico	15
1.1 Clima, tiempo atmosférico y Variables Climáticas	15
1.1.1 Definición de algunas variables climáticas	16
1.1.2 Algunos efectos del clima en la producción de cultivos	17
1.2 Internet de las Cosas	19
1.3 Redes de Sensores.....	22
1.3.1 Generalidades	22
1.3.2 Redes inalámbricas de sensores	23
1.3.3 Herramientas para el despliegue de WSN	25
1.4 Granjas Inteligentes	26
1.4.1 Arquitectura para desarrollo de Granjas Inteligentes.....	27
1.4.2 Retos y limitantes en la construcción de Granjas Inteligentes.....	29
1.5 Dispositivos populares usados en una WSN	30
1.5.1 Arduino	31
1.5.2 NodeMcu	32
1.5.3 nRF24L01	33
1.6 Firebase	35
1.7 Agricultura protegida	36
1.8 Cadena productiva de Hortalizas en Colombia.....	38
1.9 Agricultura Inteligente en Colombia.....	42
2. Metodología	45
2.1 Diseño del sistema para el manejo de datos climáticos.....	45
2.1.1 Selección del cultivo y descripción de este	45
▪ Evaluación y selección de la especie.....	45
▪ Aspectos agronómicos del tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	48
▪ Enfermedades del tomate	50
▪ Clima al interior de un invernadero para el cultivo de Tomate	53
2.1.2 Selección de las variables climáticas	55
2.1.3 Ubicación del cultivo y selección del invernadero	56
2.1.4 Selección de plataforma y sensores	59
2.1.5 Diseño del muestreo	62
2.1.6 Topología de la red.....	63
2.1.7 Selección de componentes de Software	63
2.2 Construcción e integración de los componentes.....	64
2.2.1 Construcción de la red de sensores.....	65
2.2.2 Gestión de la información	66
2.2.3 Construcción de componentes software	67

2.2.4	Obtención de la información	69
2.3	Validación del Funcionamiento del Sistema	70
2.3.1	Errores presentados y sus soluciones.	71
2.3.2	Verificación del funcionamiento de los nodos.	72
2.3.3	Verificación de la transmisión de la información.....	73
2.3.4	Verificación del almacenamiento de la información.....	74
2.4	Análisis de la información.....	76
3.	Resultados.....	77
3.1	Diagrama general del sistema	77
3.2	Resultados de la construcción e integración de los componentes	78
3.2.1	Resultados Construcción de la red de sensores	81
3.2.2	Resultados con los Componentes Software.....	83
3.2.3	Almacenamiento de los datos	83
3.2.4	Construcción de la aplicaciones Web y Móvil	84
3.3	Validación mediante toma de datos de variables climáticas en el invernadero ..	89
3.3.1	Resultados de las mediciones de las variables climáticas temperatura y humedad relativa en el invernadero.....	90
3.3.2	Resultados de las mediciones de humedad del suelo.....	97
3.4	Aceptación del sistema por parte del productor de tomate	97
3.5	Presupuesto	98
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	102
4.1	Conclusiones.....	102
4.2	Recomendaciones.....	104
A.	Anexo: Historias de Usuario.....	106
B.	Anexo: Datos Ambientales en la Calibración de los Sensores	109
C.	Anexo: Diagrama de clases de la aplicación móvil.....	111
	Bibliografía	113

Lista de figuras

Figura 1-1: Variables Climáticas Esenciales.	16
Figura 1-2: Arquitectura de cuatro capas de IoT	20
Figura 1-3: Representación horizontal de las aplicaciones IoT	21
Figura 1-4: Topologías de una WSN.	24
Figura 1-5: Diagramas de Voronoi	25
Figura 1-6: Capas del Modelo de Arquitectura para Agricultura Inteligente.	27
Figura 1-7: Placa Arduino	31
Figura 1-8: Dispositivo NodeMcu	33
Figura 1-9: Módulos nRF24L01.	34
Figura 2-1: Descripción botánica y morfológica del tomate.	49
Figura 2-2: Vista aérea del invernadero.	57
Figura 2-3: Interior del invernadero seleccionado.	58
Figura 2-4: Planta de tomate en el invernadero seleccionado.	58
Figura 2-5: Sensores seleccionados.....	59
Figura 2-6: Vista área del invernadero, con la división de las cuatro zonas para el muestreo.	63
Figura 2-7: Sensores DHT22 y WM-4.	66
Figura 2-8: Arquitectura para software de procesamiento de la información.	68
Figura 2-9: Arquitectura software de aplicación	68
Figura 2-10: Información de variables climáticas en formato JSON.	69
Figura 2-11: Información de tiempo y variables climáticas en formato JSON.	70
Figura 2-12: Navegación en la consola de Firebase	72
Figura 2-13: Ejemplo de Log y control de errores	73
Figura 2-14: Prueba de transmisión de la información, dentro del invernadero.	74
Figura 2-15: Verificación del funcionamiento de uno de los nodos.....	75
Figura 2-16: Verificación de escritura en Firebase Realtime Database.	76
Figura 3-1: Ubicación de los componentes por capa	78
Figura 3-2: Diseño del circuito del nodo.....	79
Figura 3-3: Diseño del circuito del Gateway.....	80
Figura 3-4: Gateway desplegado y en funcionamiento	84
Figura 3-5: Aplicación Web.....	85
Figura 3-6: Diagrama de Voronoi generado en la aplicación Web	86
Figura 3-7: Pantalla de configuración de intervalos.	87
Figura 3-8: Configuración en conjunto	88
Figura 3-9: Notificación con información detallada.....	88
Figura 3-10: Mapa con el promedio de las variables por nodos	91
Figura 3-11: Resultados carta psicrométrica - 2m.....	92
Figura 3-12: Resultados carta psicrométrica - 1m.....	92
Figura 3-13: Nodo desplegado y en funcionamiento	99

Lista de tablas

Tabla 1-1: Cadenas productivas en Colombia.....	40
Tabla 1-2: Empleo generado en la producción de hortalizas en Colombia.	41
Tabla 2-1: Comparación de variables por cada especie a evaluar.	46
Tabla 2-2: Principales enfermedades del tomate.	50
Tabla 2-3: Rangos de variables climáticas que favorecen la presencia de enfermedades en el cultivo de tomate.....	56
Tabla 2-4: Características de los sensores elegidos.	60
Tabla 3-1: Correlación Pearson de medidas de variables climáticas por sensor a temperatura ambiente en Bogotá	81
Tabla 3-2: Correlaciones promedio con todos los sensores.	82
Tabla 3-3: Comportamiento de las variables climáticas humedad relativa y temperatura por nodo a diferentes alturas	90
Tabla 3-4: Test de Duncan para Humedad relativa	93
Tabla 3-5: Test de Duncan para la temperatura.....	94
Tabla 3-6: Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa (1m)	95
Tabla 3-7: Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa -2m.....	96
Tabla 3-8: Estadística de la humedad del suelo.....	97
Tabla 3-9: Presupuesto del sistema en peso colombianos a Febrero del 2021	98

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) ha indicado la necesidad de aumentar la producción de alimentos, de cara al crecimiento de la población mundial, y que este aumento se debe lograr con esfuerzos adicionales en la agricultura[1]. En este sentido, las granjas deben estar en capacidad de producir más alimentos con la misma o mejor calidad; y, para esto, los agricultores deben usar y aprovechar las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), porque con las técnicas de agricultura convencional difícilmente se podrán satisfacer las nuevas demandas de alimentos[2]. El uso de TIC es la base de la llamada Agricultura Inteligente o 'Smart Farming', que permite mejorar la producción y calidad de sus productos agropecuarios, gestionar y facilitar la ejecución de sus procesos[3]. Los cultivos bajo invernadero presentan una mayor producción que los cultivos a libre exposición, gracias a que, en primer lugar se genera una especie de refugio que protege el cultivo de las condiciones ambientales adversas; en segundo lugar, el productor puede manipular el ambiente del cultivo según sus requerimientos, generando de esta manera un mayor rendimiento del cultivo y periodos de producción prolongados[4]. Se recomienda que en los invernaderos se cultiven productos con un valor económico alto como ciertas hortalizas y ornamentales, ya que la inversión para construir un invernadero es relativamente alta[5]. El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una hortaliza de gran importancia nutricional por ser fuente de minerales y vitaminas, además de su gran contenido de agua, y es un cultivo que se produce a libre exposición y bajo invernadero. En el 2010 fue la hortaliza que más se consumió en Colombia[6].

El presente proyecto fue realizado con el objetivo general de construir un prototipo de sistema que permita el manejo de datos climáticos en pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero. Los objetivos específicos fueron: i. diseñar un sistema para el manejo de datos climáticos usando tecnologías y dispositivos de bajo costo, ii. construir e integrar los componentes del sistema; iii. validar el sistema en el sitio seleccionado. Cada uno de estos objetivos fue cumplido, obteniendo como resultado un sistema para el manejo de datos climáticos en un cultivo de tomate bajo invernadero. En este proyecto, se entiende que el manejo de datos climáticos incluye el proceso de obtener datos de variables climáticas en el invernadero mediante el uso de TIC, el análisis de los mismos y la toma de acciones por parte del productor.

Para el logro de los objetivos se inició con una revisión de los conceptos necesarios para el desarrollo del sistema para el manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas, como acercamiento a la agricultura Inteligente; luego se seleccionó el tomate (*Solanum lycopersicum*) como especie para el estudio, se ubicó un invernadero en producción de este cultivo con el fin de evaluar en campo el sistema y se seleccionaron las tecnologías y dispositivos para construir el sistema de granja inteligente, teniendo en cuenta que fueran de bajo costo. Posteriormente se diseñó y construyó una red de muestreo de 4 puntos dentro del invernadero, usando una red inalámbrica de sensores para medir las variables climáticas temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, y se creó una aplicación móvil basada en celulares (smartphones). El prototipo de sistema construido fue validado en condición de campo en el invernadero seleccionado tomando datos de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Estos datos fueron guardados en una base de datos analizados estadísticamente. El sistema y los resultados obtenidos en las mediciones fueron compartidos con el encargado del invernadero obteniendo, quien dio un concepto.

A partir de toda la información obtenida, se analizaron las características que debe tener un sistema de granja inteligente de bajo costo enfocado al manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero, con el fin de mejorar esos cultivos y brindar recomendaciones para trabajos futuros.

Este documento tiene los siguientes capítulos Marco Teórico, Metodología, Resultados Conclusiones y Recomendaciones.

1. Marco Teórico

En la actualidad se destaca la gestión de la información en los procesos agrícolas y el uso de TIC con el propósito de mejorar la producción a partir de la recolección, procesamiento y análisis de datos en tiempo real; para esto existen diferentes tecnologías que permiten hacer mediciones, analizarlas y tomar decisiones en campo, algunas de estas relacionadas con variables climáticas, en consideración a la gran importancia de estas en el proceso productivo[7]. El uso y aprovechamiento de las TIC es la base de la Agricultura Inteligente ('Smart Farming')[3].

A continuación se revisan aspectos referidos a la importancia de las variables climáticas en la agricultura, y a tecnologías como el Internet de la Cosas (IoT por sus siglas en inglés, "Internet of Things"), las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN por sus siglas en inglés), y la plataforma de desarrollo Arduino, utilizada en la Agricultura Inteligente ("Smart Farming"). Igualmente, se revisan aspectos relevantes de la denominada agricultura protegida (bajo invernadero), de la cadena productiva de hortalizas en Colombia y de la agricultura inteligente en este país.

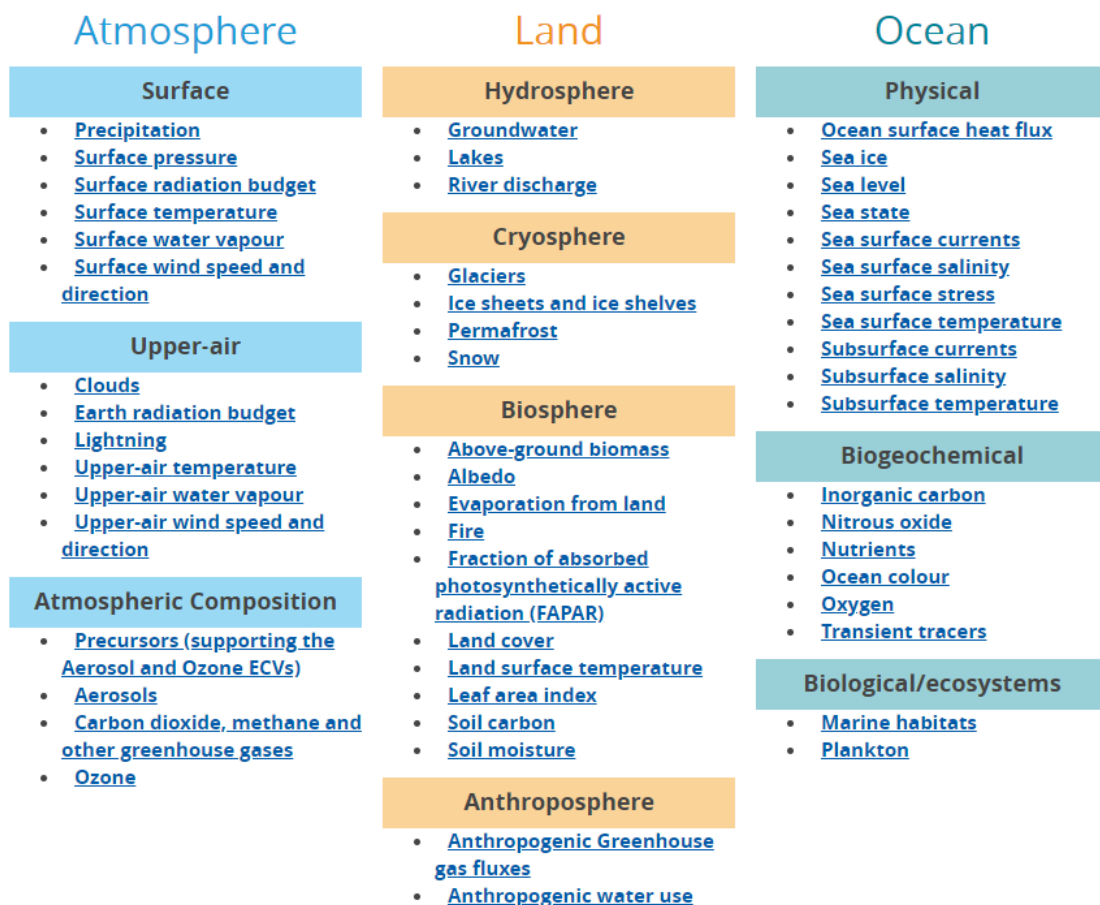
1.1 Clima, tiempo atmosférico y Variables Climáticas

Para hablar sobre variables climáticas, primero se definen dos términos que a menudo se usan equivocadamente. Se trata del clima y el tiempo atmosférico. El Clima describe las condiciones atmosféricas a lo largo de un largo periodo de tiempo (años o siglos). El tiempo climático describe las condiciones atmosféricas en un periodo corto de tiempo (minutos a semanas)[8] .

Las variables climáticas son aquellas que permiten la caracterización del clima de la tierra o de un lugar en particular. Estas pueden ser físicas, químicas o biológicas. En la superficie de la atmósfera podemos encontrar presión de la superficie, temperatura de la superficie

e inicio de la precipitación (esto ocurre cuando el vapor de agua atmosférico se condensa y cae desde las nubes por gravedad). En la tierra, se encuentran variables como la humedad del suelo, agua subterránea, la evaporación terrestre y la temperatura en la superficie de la tierra[9]. La figura 1-1 ilustra el total de variables climáticas esenciales.

Figura 1-1: Variables Climáticas Esenciales.



Tomado de <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/about/ecv-factsheets>

1.1.1 Definición de algunas variables climáticas

Las variables climáticas afectan la producción agrícola de diferentes maneras y debido al cambio climático se ha despertado mayor interés en el estudio del clima. A continuación se presentan las definiciones de algunas variables climáticas a destacar para el desarrollo del presente proyecto, a partir del glosario del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)[10]:

- **Temperatura:** En la página web del Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía, una entidad española que recopila y difunde información sobre medio ambiente y salud, se encuentra la siguiente definición para la temperatura: “Estado del ambiente que se manifiesta en el aire y en los cuerpos en forma de calor, en una gradación que fluctúa entre dos extremos que, convencionalmente, se denominan: caliente y frío”)[11]. El IDEAM la define como “Magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio media de las moléculas en un cuerpo físico”[10].
- **Humedad Relativa del Aire:** Definida en el glosario del IDEAM como “Es el vapor de agua que existe en una masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total que existiría si el aire estuviese saturado a esta temperatura. Se expresa en unidades enteras que van de cero (0) hasta el 100%”[10].
- **Humedad del Suelo:** Según el IDEAM “Humedad contenida en la parte del suelo situada por encima de la capa freática, incluyendo el vapor de agua contenido en los intersticios del suelo. En ciertos casos, este término se aplica exclusivamente a la humedad contenida en la capa en que arraigan las plantas”[10].
- **Precipitación:** Por último, “La precipitación es la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. La cantidad de precipitación es el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado”[10].

1.1.2 Algunos efectos del clima en la producción de cultivos

La literatura reporta diferentes estudios acerca del afecto de las variables climáticas en la producción agrícola, considerando el cambio climático. En el año 2009, el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias publicó un artículo que presenta un modelo en el cual se analiza la producción de los alimentos como el trigo, el arroz, y el maíz, entre otros, para el año 2050, en relación con el cambio climático (aumento de temperatura y cambio de precipitaciones); el artículo concluye que la producción agrícola a nivel mundial tendrá una considerable reducción, lo que tendrá un efecto negativo sobre la humanidad[12].

Otro estudio sobre la relación entre el cambio climático y la fenología de árboles frutales y algunos cultivos en Alemania, con datos obtenidos entre 1960 y el año 2000, tuvo como principal variable la temperatura del aire, y mostró cómo las heladas pueden

generar daños considerables en la etapa de floración en los cultivos[13]. Además, el clima y la humedad del suelo pueden generar modificaciones en la concentración de nutrientes del fruto, con cambios asociados también a la época de la floración, tal como fue encontrado en una investigación realizada en cultivos de aguacate hass en Michoacán – México. Este cultivo fue seleccionado para esa investigación debido al amplio pedido de cosecha que presenta esta baya en la región[14].

Recientemente, investigadores de la Universidad de California realizaron un estudio en cual se analizaron los efectos del cambio climático sobre la temporada de cultivo de tomate, en cinco condados de California; como resultado se generó un modelo con el cual se ha estimado una reducción del tiempo necesario para que en los cultivos se pase de una etapa de crecimiento a otra; esto debido al aumento de temperatura proyectado para los próximos años. Los resultados del estudio pueden servir a los granjeros en la toma de decisiones para la gestión de sus cultivos, respecto a las fechas de cultivo y siembra, por ejemplo[15].

En un artículo relacionado con la adaptación al cambio climático en la agricultura de Colombia, se menciona la necesidad que el pequeño agricultor se prepare para afrontar los diferentes problemas asociados, y que se pueden incrementar en los próximos años (2030-2050), como el aumento de temperatura en algunas zonas, mayor variabilidad en las precipitaciones e incremento del estrés hídrico. Según el artículo, se verán afectados cultivos como café, maíz, soja y tomate; allí se presentan algunas posibles soluciones, relacionadas con la gestión de variables climáticas[16].

A. Vallejo en su libro “Mejoramiento genético y producción del Tomate en Colombia” describe como algunas especies de tomates silvestres presentan resistencia a bajas temperaturas (*L. hirsutum*), resistencia a plagas (*L. esculentum*), resistencia a la sequía (*L. esculentum*) e incluso resistencia a la humedad del suelo excesiva (variedad cerasiforme) gracias a ciertas características en sus raíces [17].

Esto sugiere que el uso de algunos genes, presentes en determinadas especies de tomate silvestre, pueden servir para programas de fitomejoramiento orientados a generar resistencia a variables climáticas adversas, mejorando la producción de este importante cultivo.

Los estudios citados destacan la importancia de tener en cuenta el efecto del clima en el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad de la producción de cultivos. Esto cobra

mayor relevancia frente a las alteraciones que vienen ocurriendo en las variables climáticas, tales como precipitación, temperatura y humedad relativa, a raíz del cambio climático.

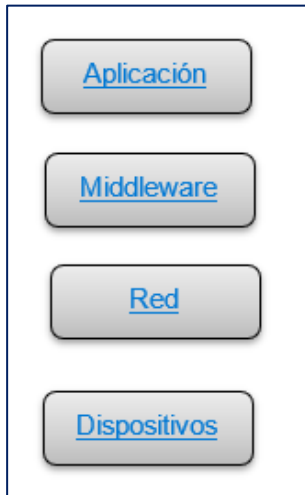
1.2 Internet de las Cosas

Internet de las cosas (IoT) es un paradigma que busca conectar diversos dispositivos como sensores, teléfonos celulares y una importante cantidad de objetos en el entorno, para realizar tareas de recolección, transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos del ambiente, con el propósito de tomar acciones a partir del análisis de estos, usando el protocolo de internet[18].

La idea principal de IoT es poder conectar diversos dispositivos como son Tag RFID, sensores, actuadores y celulares, entre otros. Las tecnologías inalámbricas tienen un rol importante en el Internet de las Cosas. No se trata solamente de que un objeto recolecte información, sino que también se comunique con otros objetos intercambiando datos por medio del protocolo de internet[18], y así favorecer la toma de decisiones, que puede ser llevada a cabo por los propios objetos.

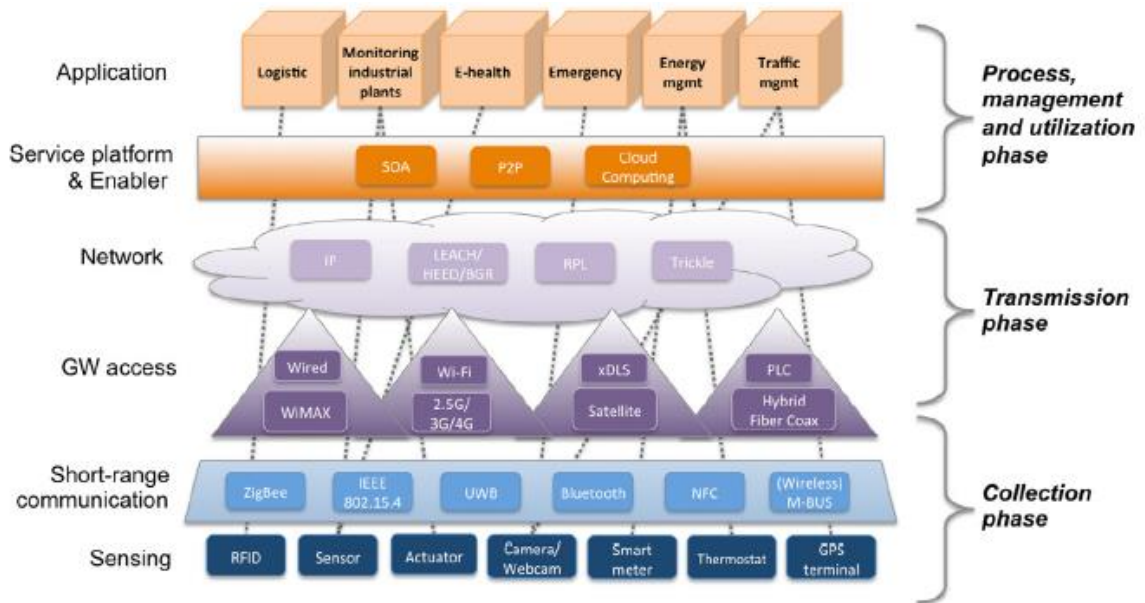
Un estudio comparativo de los protocolos de IoT en el 2018 estimó que para el año 2020 existirían cerca de 25 billones de objetos o cosas conectados, debido a esto, a la evolución que han tenido los objetos, y a la flexibilidad con que es necesario conectarlos, no existe una arquitectura única definida para IoT, pero se ha propuesto una arquitectura compuesta por cuatro capas [19] las cuales se pueden ver en la figura 1-2.

La capa de dispositivos es de tipo físico y está formada básicamente por sensores que obtienen datos del ambiente. La capa de red es la responsable de conectar los sensores y demás objetos inteligentes para que los datos obtenidos sean transmitidos, siendo posible implementar uno o varios protocolos de red; allí los datos serán procesados y analizados. La información obtenida será utilizada en la capa de middleware, donde se ubican los servicios y el soporte de la capa de aplicación. La capa de aplicación consiste básicamente de la interfaz de usuario [19].

Figura 1-2: Arquitectura de cuatro capas de IoT

Elaboración propia

E. Borgia propone tres fases (ver figura 1-3) en las que se desarrolla la interacción del mundo físico y el cibernético: fase de recolección en la que por medio de sensores se realiza la medición de las variables del ambiente, y a su vez esta es recolectada por tecnologías como Bluetooth o IEEE 802.15.4; en la fase de transmisión la información obtenida en la anterior fase, se envía a servidores y diferentes aplicaciones usando WiFi, por ejemplo; y por último la fase de procesamiento, administración y uso, en la cual, con la información procesada y analizada se realiza la toma de decisiones, enviando retroalimentación con el fin de controlar las aplicaciones; la Cloud Computing, o la SOA son utilizadas en esta fase[18].

Figura 1-3: Representación horizontal de las aplicaciones IoT

E. Borgia / Computer Communications 54 (2014) 1–31.

Varios investigadores del Chaitanya Bharathi Institute of Technology en la India desarrollaron un sistema IoT para ayudar con el crecimiento eficiente de cultivos. Este sistema, entre otras funciones mide las variables de temperatura, humedad del suelo y humedad relativa, y realiza el análisis en un smartphone por medio de la plataforma *blynk*. Además, regula la humedad del suelo por medio de un sistema de riego que tiene una bomba de agua conectada a un motor DC que se activa automáticamente[20]. De otro lado, en Tailandia, se desarrolló un sistema que detecta el estrés en lechugas orgánicas usando un prototipo de sensor de fluorescencia de clorofila, para esto fue necesaria la integración con varias tecnologías, y se destaca el uso de la plataforma Thingspeak, para el análisis de datos en IoT [21].

El papel que desempeñan los actuadores es un valor agregado, por ejemplo, si en un cultivo se implementa una solución IoT para fertilización que permita, aplicar la cantidad correcta de fertilizante en el momento oportuno, se facilitaría el trabajo del agricultor, permitiendo usar su tiempo en otras actividades de la granja.

1.3 Redes de Sensores

En muchos casos, un solo sensor es insuficiente para hacer las mediciones del fenómeno de interés, y se requiere el despliegue de varios sensores que envíen la información a una estación para luego ser procesada; esto es llamado una red de sensores.

1.3.1 Generalidades

Un sensor es un dispositivo con el cual es posible medir un fenómeno del mundo físico, que puede ser luz, gases, vapor de agua, temperatura o viento, entre otros. Estos dispositivos usan voltaje para su funcionamiento, y convierten los datos recolectados en señales digitales o análogas [22].

Una red de sensores está formada por varios sensores desplegados de forma tal que se puedan comunicar entre estos, con el fin realizar la medición de un fenómeno de manera colaborativa o espacial. Los sensores deben ser desplegados cerca al fenómeno que están midiendo. Los sensores o nodos recolectan datos que serán transmitidos a la puerta de enlace o Gateway[23] o estación base; un dispositivo cuya función es recolectar todos los datos obtenidos por los sensores para su posterior transmisión a las demás capas y realizar un procesamiento y análisis.

Dependiendo de las restricciones del ambiente y el fenómeno que se está monitoreando, la posición de los sensores puede ser determinada de manera específica (planned fashion) o aleatoria (random fashion). El despliegue de los nodos tiene influencia en factores como la densidad de nodos, la cobertura, la fiabilidad, y la comunicación. El despliegue puede realizarse una sola vez o incluso ser un proceso iterativo. La topología de una red de sensores, o forma de conectar los sensores, puede cambiar con el paso del tiempo[24].

Podemos afirmar que una característica de las redes de sensores tiene que ver con el esfuerzo colaborativo para transmitir la información; un sensor debe estar en la capacidad de transmitir la información que obtiene hasta otro sensor para que llegue a la puerta de enlace.

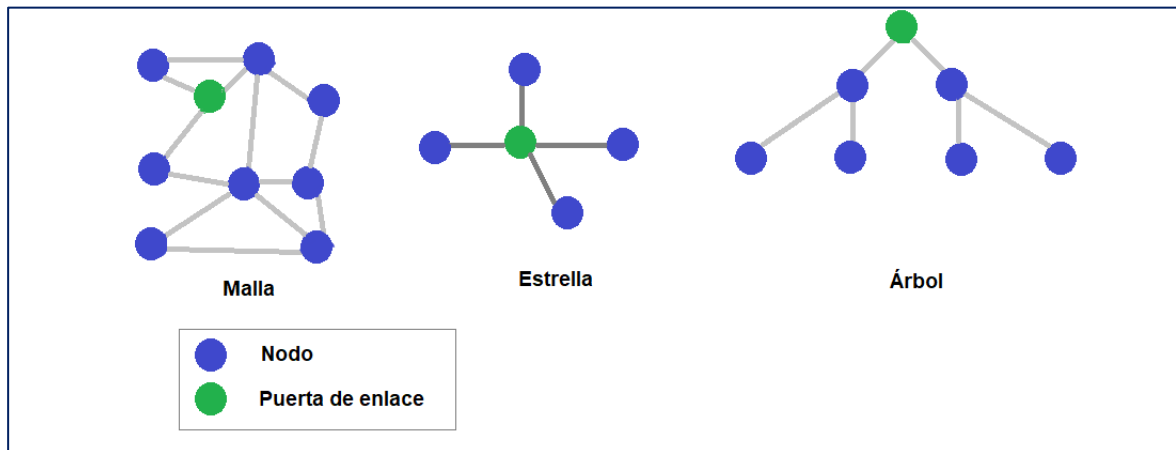
Dependiendo de la aplicación, en una red de sensores, además de la información del fenómeno que se está midiendo, se espera poder obtener información espacial para una efectiva localización[24]. Por ejemplo, en una WSN desplegada en un cultivo, no solo se espera obtener la información de variables como humedad del suelo o temperatura, sino también la localización del sensor que realiza estas mediciones.

1.3.2 Redes inalámbricas de sensores

Una red inalámbrica de sensores (o WSN por sus siglas en inglés) se puede definir como un conjunto de nodos sensores autónomos en los que la comunicación se realiza por medio de canales inalámbricos[24].

Una red inalámbrica de sensores es un subconjunto de una red de sensores, y aunque comparten muchas características, su principal diferencia está en la comunicación entre nodos la cual se realiza de manera inalámbrica.

En la figura 1-4 podemos observar las topologías de las WSN. Existen tres topologías, cada una con sus ventajas y desventajas. La topología en malla permite que se transmita la información entre nodos que se encuentren cerca o dentro del rango de comunicación hasta llegar al coordinador. En la topología en estrella cada nodo o sensor se conecta directamente con la puerta de enlace, mientras que la topología en árbol permite que cada nodo se conecte con un nodo de nivel “superior” hasta llegar al coordinador[25].

Figura 1-4: Topologías de una WSN.

Elaboración propia

Algunos casos exitosos de la implementación de una WSN en procesos de agricultura, como por ejemplo la medición de ciertas variables como la temperatura, se describen a continuación.

Un estudio realizado por investigadores del Electronics Research Institute en El Cairo, demostró, con la implementación de una WSN sobre un cultivo de papa, que la inversión para desarrollar el sistema es recuperada en un año a partir de los beneficios obtenidos con el uso de esta. Dentro de las variables que mide el sistema se encuentran la temperatura, la humedad relativa y el pH del suelo[26].

Un factor que se debe tener en cuenta al desplegar una WSN para aplicarla a los procesos de agricultura inteligente, es que en la transmisión de datos se sorteen los obstáculos propios del ambiente como los arbustos o la altura de los cultivos.

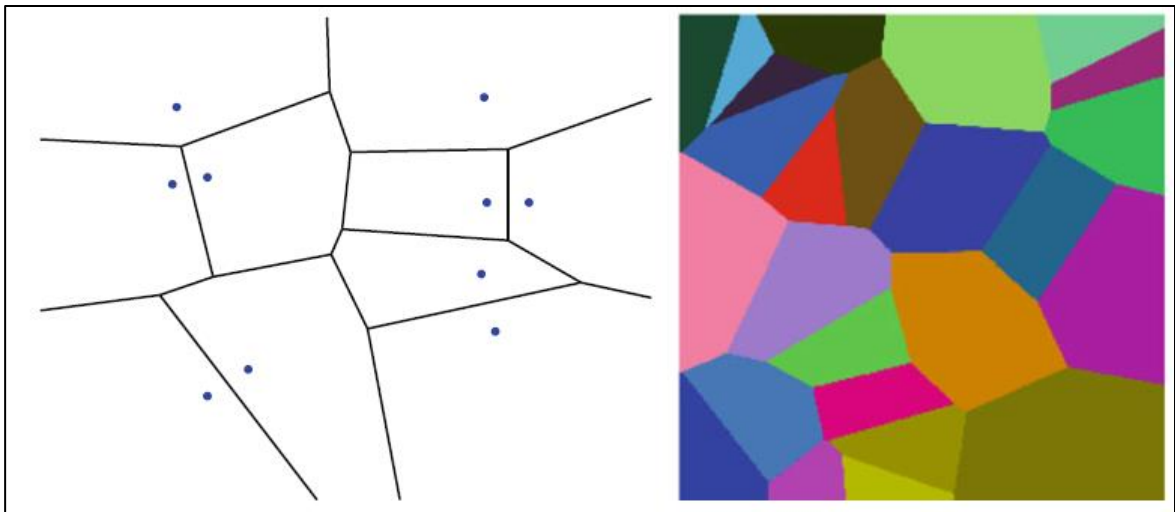
El uso de WSN en las granjas de los ejemplos anteriores, permite la recolección de datos de variables ambientales para facilitar la toma de decisiones en los procesos agrícolas (por ejemplo riego, prevención de heladas, manejo de enfermedades), con el fin de mejorar la producción.

1.3.3 Herramientas para el despliegue de WSN

Los diagramas de Voronoi y las triangulaciones de Delaunay, son herramientas matemáticas que ayudan en el modelado para el despliegue de la red de sensores[24]. La figura 1-5 muestra dos ejemplos de diagramas Voronoi desplegados aleatoriamente.

Los diagramas de Voronoi son definidos por B. Kalantari[27] de una manera muy sencilla. Considérese un número finito de puntos en el espacio; cada uno de estos puntos tiene una célula Voronoi la cual consiste en el conjunto de puntos que están más cerca a ese punto que a cualquier otro de los otros puntos. El diagrama de Voronoi es la división del espacio en el conjunto de células Voronoi junto con los límites.

Figura 1-5: Diagramas de Voronoi



Wireless Sensor Networks. (Selmic, Rastko R. 2016.)

En algunos estudios, bien sea por el espacio o la naturaleza del fenómeno que se esté midiendo, un sensor será suficiente. Pero existen casos en los que se deben utilizar más sensores, es en este escenario en donde se recomienda la construcción de una red de sensores que garantice confiabilidad, particularmente cuando se espera variabilidad espacial de la(s) variable(s) a medir. El diseño de la red de sensores, inalámbrica o no, debe considerar variables como el espacio, la naturaleza de fenómeno y los recursos

económicos, La facilidad de cambiar la ubicación de los sensores es otro aspecto a tener en cuenta al momento de tomar decidir acerca de una red de muestreo.

1.4 Granjas Inteligentes

El uso y aprovechamiento de las TIC aplicadas en una granja para mejorar la producción y calidad de sus productos, gestionar y facilitar la ejecución de sus procesos relacionados con el agro y la ganadería es llamado Agricultura Inteligente o 'Smart Farming'[3].

La agricultura inteligente ayuda a la toma de decisiones para administrar las variaciones en la producción agrícola, por medio de la recolección datos en el campo, el análisis y la utilización de la información obtenida. Dada la heterogeneidad intrínseca de los sistemas productivos agrícolas, se tiene el concepto de agricultura de precisión, entendida como el manejo de la variabilidad de los agroecosistemas para mejorar su productividad[28].

Una aplicación móvil para monitorear cultivos de arroz fue desarrollada por investigadores de la Universiti Putra Malaysia. Una de las funciones que tiene esta aplicación es que el productor pueda ver que zonas del cultivo necesitan mayor atención. Los datos de entrada de la aplicación para generar el análisis del estado del cultivo, son imágenes tomadas con Vehículos aéreos no tripulados[29].

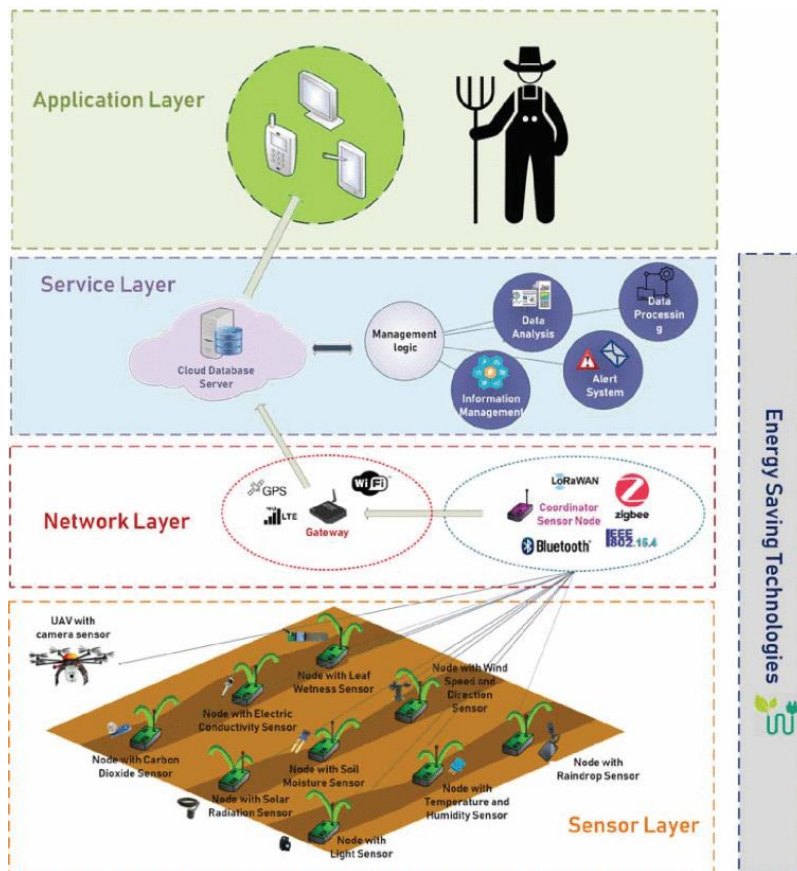
Un sistema de control ambiental desarrollado con tecnologías de bajo costo se construyó y se probó en el "Cultivos de Tejidos Vegetales" de la Universidad de Tarapacá. El sistema tiene una aplicación Web que permite monitorear ciertas variables climáticas, y está provisto de varios tipos de sensores[30].

Con el propósito de ofrecer a los agricultores de Nigeria un sistema que permita monitorear y controlar de manera remota los invernaderos, se construyó un prototipo de invernadero habilitado por IoT; por medio de una aplicación Android se controla la luz, el bombeo de agua, el encendido y el apagado de ventiladores, entre otros dispositivos. El objetivo es lograr que el invernadero pueda ser controlado en gran medida por medio de la aplicación, usando la información obtenida de varios sensores. Este sistema usa la plataforma Thingspeak para guardar la información [31].

1.4.1 Arquitectura para desarrollo de Granjas Inteligentes

Investigadores de la Universidad del Oeste de Macedonia propusieron un modelo de arquitectura que tiene como propósito ofrecer un marco de trabajo para desarrollar Granjas Inteligentes, combinando IoT y WSN y está dividido en cuatro capas, similares a las cuatro capas de la arquitectura de IoT; dentro de cada una de estas se ubican las actividades necesarias para la agricultura inteligente, a saber: la detección de parámetros agrícolas, la ubicación y detección de datos, la trasmisión de datos y la toma de decisiones a partir del análisis y procesamiento de los mismos [32].

Figura 1-6: Capas del Modelo de Arquitectura para Agricultura Inteligente.



An Architecture model for Smart Farming. Tomado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8804834/>

Esta arquitectura puede verse en la figura 1-6. Las cuatro capas del modelo se describen a continuación:

- **Capa de sensores:** En esta capa se incluyen todos los sensores y demás objetos que permitan la recolección de los datos, ubicándolos en el suelo o en la parte aérea del cultivo. Se destacan las mediciones climáticas de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y radiación solar. Entre los sensores más usados en Granjas Inteligentes se destacan los sensores DHT11 y DHT22 utilizados para medir la humedad relativa y el sensor de temperatura LM35 [32]. Los datos adquiridos por los sensores deben ser enviados a internet por medio de la WSN. Un nodo sensor consiste básicamente en un sensor, un transceptor con una antena de radio, una fuente de energía y un microcontrolador. Los módulos de comunicación inalámbrica comúnmente usados son XBee, WSN802G y NRF24L01. En cuanto a microprocesador, algunos muy conocidos y usados son Arduino, Raspberry y Atmega328. El costo y el consumo de energía de cada nodo sensor, depende de las capacidades y complejidad. En general se recomienda implementar estrategias de ahorro de energía.

- **Capa de Red:** Esta capa está compuesta por los dispositivos y tecnologías disponibles para transmitir los datos de los sensores al internet. Para una mayor eficiencia en el despliegue y una obtención de datos rápida se recomienda el uso de una WSN. El despliegue de varios nodos de sensores en los cultivos para tomar mediciones en estos, ayuda al cultivador a realizar tareas de mantenimiento y supervisión [32].

Para conectar los nodos sensores entre la red, ofrecer un canal de comunicación entre el nodo coordinador y el Gateway se usa la WSN. No existe una topología específica, ya que depende de la necesidad y tecnologías seleccionadas. Cuando se obtienen los datos desde el nodo sensor, este envía la información al Gateway para luego enviarlo al servidor principal en donde se encuentra la base de datos. Un protocolo común para poder comunicar los nodos sensores y una estación base es el WiFi.

- **Capa de Servicios:** Encargada de procesar y analizar los datos recolectados. Tiene gran importancia debido a que las decisiones se toman a partir de los resultados del análisis, que debe estar apoyado por un sistema de soporte de decisiones (DSS por sus siglas en inglés). El análisis de datos, desarrollado en esta capa, es considerado como un componente muy importante en IoT, ya se pueden prevenir errores durante los procesos de agricultura. Esta capa provee servicios como la administración de la información, que corresponde con el proceso de recolectar,

guardar, mantener la información, usando como herramienta MySQL. Otro servicio que se encuentra en esta capa es el análisis Big Data, en el que la información se extrae, se transforma, se modela y se visualiza, con el fin de descubrir información útil para tomar decisiones. En cuanto a la minería de datos, este servicio permite procesar la información de manera sistemática para identificar patrones ocultos en grandes cantidades de información; como herramienta se puede usar Hadoop o Apache Spark. [32].

- Capa de Aplicación: Muestra al agricultor o al usuario final la información obtenida por el sistema de manera que este pueda inspeccionar los resultados y tomar acciones según corresponda. La forma de mostrar los resultados debe ser amigable para el usuario. Dentro de los tipos de aplicaciones se destacan las aplicaciones de mapeo de malezas, sistemas de riego basados en IoT, Fertilizantes de dosis Variables, y aplicaciones con alertas y notificaciones. Estas últimas son muy populares ya que permiten a los agricultores y a las industrias llevar un seguimiento de los cultivos a partir de la información recolectada por los diferentes dispositivos, la cual es transformada y procesada para que en la aplicación se muestre el estado y salud del cultivo. Todas estas aplicaciones tienen como objetivo la administración de los cultivos ya que se incrementa la evidencia en la producción, se controla el consumo de agua, se protege el suelo, se mejora la calidad de los productos, entre otras actividades [32].

1.4.2 Retos y limitantes en la construcción de Granjas Inteligentes

Varios son los retos que se deben enfrentar al momento de la construcción de un sistema de granja inteligente. Entre mayor cantidad de obstáculos físicos existan, la distancia de comunicación entre dispositivos inalámbricos se debe reducir para evitar pérdidas de señal. Otro factor que puede generar disminución en la intensidad de la señal es la humedad relativa en los cultivos. El tipo del cultivo, las características del crecimiento y la ubicación de los dispositivos son otros factores que pueden afectar el funcionamiento de la WSN[33].

Los investigadores de la Universidad de Macedonia[32] listan varios retos de arquitectura en la construcción de la granja inteligente. El primero tiene que ver con el despliegue de dispositivos en un ambiente natural, con variaciones climáticas, y de cómo hacerlos funcionar por un considerable periodo de tiempo, teniendo en cuenta que la vida útil de las baterías es muy corta. Por esto se debe construir el sistema con protocolos y configuraciones que minimicen el consumo de energía. Debido a la baja memoria en los nodos, se pueden generar colas de datos entre nodos ocasionando retrasos en la transmisión de la información; esto también puede ser generado por una larga distancia entre nodos.

Los sensores varían en tamaño y complejidad de sus capacidades. El costo de construir un sistema para una granja inteligente depende de la calidad de los materiales y la topología de red utilizada[32].

Aunque cada capa dentro de la arquitectura seleccionada es de vital importancia, para este proyecto se destaca la capa de servicios, encargada de la gestión de la información recopilada; es el recurso con el que se alimentarán las aplicaciones que utilizará el usuario final con el fin de tomar decisiones. Contar con una buena gestión de la información permitirá construir y ofrecer diferentes servicios a diferentes plataformas.

1.5 Dispositivos populares usados en una WSN

Se describen a continuación un conjunto de dispositivos utilizados en el desarrollo de WSN y en proyectos de IoT; la selección de estos dispositivos se hizo según varios artículos consultados, y la documentación en páginas de soporte relacionados con cada uno de ellos, que se pueden encontrar en internet, por lo que pueden llegar a ser considerados dispositivos populares para el desarrollo de soluciones IoT y de WSN. Además, se tuvo en cuenta su costo, puesto que esta revisión enfatiza en pequeños productores agrícolas.

1.5.1 Arduino

Es una plataforma de código abierto, que ha sido empleada en diversos proyectos como circuitos electrónicos básicos, hasta instrumentos científicos. Está formada por una parte física, el microcontrolador, y una parte de software que es ejecutada en un computador[34].

Arduino es económico, por ejemplo a finales del 2019 se podía conseguir una placa Arduino UNO por USD 7.8; además, es fácil de usar, se asocia con el hecho que se creó con fines de enseñanza, y cuenta con gran documentación en internet, por su naturaleza de Código Abierto. Arduino tiene una comunidad activa que genera amplia documentación para realizar diversos proyectos. Basta con hacer una búsqueda en internet y comprobar el abanico de posibilidades que ofrecen algunas tiendas de electrónica.

La placa Arduino, la cual se puede observar en la figura 1-7, tiene una entrada para recibir energía y ser accionada, bien sea por un cable USB conectado a un PC o alguna otra fuente de energía eléctrica, como pequeñas baterías. Además, cuenta con varios pines o contactos metálicos. Algunos tienen una función específica ya definida por el fabricante, como recibir la alimentación de energía, en otros, la función puede ser definida por el desarrollador.

Figura 1-7: Placa Arduino



Tomado de página Web de Arduino. <https://store.arduino.cc/>.

Se destacan algunos pines como el GND o Ground, entrada de 5 y 3.3 V, usados para suministrar voltaje; Pines “Análogos” con los cuales se pueden leer señales desde

sensores análogos; Pines Digitales que permiten la entrada de datos; Botón para reinicio de código cargado en la placa, y Pines Tx (transmisión) y Rx,(recepción) usados en la comunicación serial[35].

La restricción en el consumo de energía es un tema recurrente en los trabajos de investigación relacionados con IoT, y Granjas Inteligentes; por citar un ejemplo, en[32] se menciona el tema como un requerimiento de importancia. En la página web <https://www.luisllamas.es/>, página en la cual se pueden encontrar diversos tutoriales sobre Arduino, se mencionan varias opciones para la alimentación de este, pasando por baterías alcalinas, baterías recargables, hasta algunas opciones que requieren cierto conocimiento para su uso como son las LiPo.

Un sistema para el monitoreo de temperatura y luminosidad en invernaderos fue desarrollado usando Arduino como medio para enviar a internet la información [36]. Un sistema para el control de variables como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y luminosidad, se desarrolló usando sensores y actuadores de bajo costo, utilizando Arduino como microcontrolador[37].

1.5.2 NodeMcu

La definición que se encuentra en la página oficial de este dispositivo es la siguiente: “*An open-source firmware and development kit that helps you to prototype your IoT product within a few Lua script lines*”. Es un dispositivo que junto con su kit de desarrollo facilita la construcción de aplicaciones IoT.

Figura 1-8: Dispositivo NodeMcu

Elaboración Propia

Básicamente, NodeMcu es un microcontrolador con un chip integrado que permite la conexión a Wi-Fi, lo que facilita la conexión a Internet. Necesita una fuente de alimentación de 3.7 V. Fue usado en el desarrollo de un sistema para medir condiciones ambientales en un laboratorio perteneciente a un Centro de Medicina Familiar en Prizren, Kosovo[38], y es considerado con un dispositivo de considerable importancia para la construcción de soluciones IoT, debido a su costo y funciones[39]. Este dispositivo puede verse en la figura 1-8, comparando su tamaño con el de una moneda. Es relativamente económico, tiene un costo aproximado de 5 USD.

1.5.3 nRF24L01

Es un transceptor que cuenta con un chip de 2.4 GHz, disponible para aplicaciones inalámbricas de bajo consumo de energía. Se requiere usar en conjunto con un microcontrolador. Soporta velocidades de transmisión de datos en el aire de 250kbps, 1Mbps, y 2Mbps[40]. Permite realizar configuraciones como la frecuencia del canal, la salida de poder y la tasa de datos en el aire. En la figura 1-9 se pueden observar dos modelos del nRF24L01, con y sin antena, este último con menor alcance.

Figura 1-9: Módulos nRF24L01.



Elaboración propia.

Tiene varios modos en los que puede funcionar como por ejemplo, standby, transmisión y recepción[40]. Este módulo es utilizado en un framework genérico para realizar mediciones de las cantidades de energía empleadas en una WSN[41].

Según el modelo, su precio está en el intervalo de 1.25 USD el más sencillo, hasta los 5 USD el que tiene incorporada la antena.

Para este proyecto, el costo de los insumos fue un factor determinante al momento seleccionar un dispositivo frente a otro que presentara similares características. La popularidad de estos dispositivos se debe en gran parte al costo, la facilidad de uso, y la cantidad de información relacionada con tutoriales y manuales, tanto oficiales como no oficiales, además de la existencia en muchos casos, de comunidades que ayudan a resolver problemas en blogs de internet.

Algunos ejemplos ya citados, como el caso del hospital en Kosovo, muestran la capacidad y calidad de los dispositivos para ser utilizados en proyectos científicos, teniendo además un bajo costo.

El costo de la construcción de una WSN radica entonces en la cantidad de sensores, el sensor seleccionado, y los demás dispositivos usados para dar soporte a los procesos de recolección y transmisión de información.

1.6 Firebase

Firestore es una plataforma para el desarrollo de aplicaciones Web y Móviles; esta cuenta con varias API, entre ellas se destacan Android, Web, iOS, C++. La Firestore Realtime Database es uno de los productos de Firestore. Es una base de datos NoSQL que se aloja en la nube. Todos los clientes se sincronizan con la base de datos, lo que permite acceder a la información en tiempo real.

En esta base de datos la información se guarda en formato JSON; todos los clientes reciben actualizaciones de manera automática, ya que se encuentran sincronizados. Cuando se cambia la información, se envía la actualización a todos los clientes que se encuentren conectados. Más información puede ser consultada en la página oficial <https://firebase.google.com/docs>.

A continuación se realiza un breve resumen de cada uno de los patrones que se mencionan en el artículo <https://firebase.googleblog.com/2013/03/where-does-firebase-fit-in-your-app.html>. Este es un artículo publicado en un blog de Firestore, en el que se describen tres patrones comunes en el desarrollo de aplicaciones que implementan Firestore. Aunque se le listan como *patrón*, también usa en este artículo el término Arquitectura para referirse a estos.

El primero de los patrones es “*Aplicaciones 100% desarrolladas con Firestore*”, recomendado para aplicaciones nuevas en las cuales el contenido es estático, y a la vez, este es mostrado desde Firestore.

El segundo patrón es “*Aplicaciones desarrolladas con Firestore con código de servidor*”. Este patrón puede ser usado implementado cuando los recursos del cliente no son suficientes y se requiere que el código se ejecute en un servidor. En este caso, Firestore se ubica entre el servidor y los clientes; el servidor está conectado a Firestore y se comunica con los clientes manipulando los datos de Firestore.

Por último está el patrón “*Aplicaciones existentes con funciones desarrolladas con Firestore*”. En este patrón, los clientes se conectan tanto al servidor como a Firestore.

Firestore provee los servicios en tiempo real sin interferir con las demás funcionalidades existentes que requieren del otro servidor. Se recomienda implementar este patrón cuando se tiene una aplicación con varias funcionalidades, no se planea cambiar la infraestructura, y se desean agregar algunas funciones disponibles con Firestore.

Firestore cuenta con un plan gratuito, el Spark Plan. Este plan permite, para el caso de RealTime Database, un máximo de 100 conexiones, Guardar hasta 1 GB y descargar 10 Gb por mes. Para mayor capacidad en los servicios se debe realizar un pago según la necesidad. Mayor información puede ser consultada en la página web de Firestore dedicada a los precios, <https://firebase.google.com/pricing>.

1.7 Agricultura protegida

La agricultura protegida es aquella en la que el agricultor puede controlar algunos factores ambientales, minimizando el impacto del clima en los cultivos[42], mediante el uso de diferentes estructuras para mejorar la producción. Actualmente se cuenta con un considerable número de estructuras según el cultivo y la región[43].

Una de las instalaciones que permiten el desarrollo de agricultura protegida se denomina invernadero y consiste de una estructura metálica o de madera, cubierta con plástico o vidrio. El International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA)[44], muestra algunas ventajas de usar agricultura protegida bajo invernaderos, entre ellas, el aumento de la productividad y el cultivo de productos en zonas con deficiencia de agua. Además, es posible cultivar en periodos de invierno en países con estaciones, y cuando ocurren fenómenos de heladas en países tropicales.

El invernadero es una estructura que permite el paso de la luz solar a través del techo, de manera que se pueda acumular calor en el día y desprenderse en las noches cuando la temperatura baja. Así se evitan pérdidas en los cultivos por las heladas y bajas

temperaturas. En los invernaderos es posible controlar y modificar el clima en su interior, según la necesidad de cada cultivo. Si se realiza un buen manejo del clima en el invernadero, se pueden tener temperaturas en el intervalos de 17°C - 27°C en el día y mayores a 5°C en la noche[45].

De esta manera se aumenta el rendimiento en los cultivos, la producción se puede realizar en cualquier época del año, se tiene un mejor control de plagas y el tiempo de crecimiento de los cultivos se reduce al controlar la temperatura y la humedad relativa.

El Senasica del Gobierno Mexicano (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria) lista otras estructuras para el desarrollo de la agricultura protegida como el microtúnel, el macrotunél, mallas sombra, mallas contra insectos y pájaros; destaca que en el caso del invernadero una altura correcta para el desarrollo del cultivo y resume los beneficios del uso de la agricultura protegida en la posibilidad de cultivar en cualquier época del año con menos ataques de plagas y enfermedades[42]. Esto último depende del conocimiento y manejo del cultivo.

En México, la aplicación de agricultura protegida en hortalizas ha mostrado un crecimiento entre el 20 y 25% anual. Por ejemplo, en el año de 1980, se estimaban 300 hectáreas de hortalizas con agricultura protegida. Para el año 2008 ya se tenían reportes de cerca de 10.000 hectáreas. Por su parte, un estudio comparativo sobre agricultura a libre exposición y protegida realizado en Nicaragua concluyó que para el tomate y el chile dulce el rendimiento del cultivo con agricultura protegida fue superior que a libre exposición o; de hecho el chile dulce que se cultivó bajo esta última condición murió antes de la cosecha[46].

Colombia tiene una extensión de cultivo bajo invernadero que representa el 0.73% del nivel global. Supera a Estados Unidos que tiene el 0.52%, aunque lo aventajan países como México con el 1.58% o Italia con el 17%. La producción bajo invernadero en Colombia se enfoca principalmente en cultivos de flores, aunque también se encuentran hortalizas,

frutas y aromáticas, según un boletín del año 2014, de la Superintendencia de Industria y Comercio y la Universidad Javeriana[47].

En la cadena productiva de plantas aromáticas medicinales condimentarías y afines, las especies que se exportan son cultivadas principalmente bajo invernadero, pero los costos son relativamente considerables, p. ej. para el 2015, la inversión inicial de un invernadero con riego en albahaca para exportación estaba entre 120 y 150 millones (SIOC. <https://sioc.minagricultura.gov.co/PlantasAromaticas/Documentos/2017-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>).

A diferencia de los cultivos a libre exposición, un invernadero requiere mayor inversión, según el diseño (forma, altura, uso de cortinas o ventanales para regular temperatura) y materiales utilizados. Entre los propósitos para establecer cultivos bajo invernadero se tiene: controlar variables climáticas y plagas de los cultivos; aumentar la producción; acortar el ciclo del cultivo[48]; y, mejorar la calidad y por tanto su comercialización. Pero, aunque el invernadero permite aumentar la producción de ciertos cultivos, comúnmente se requiere el uso de semilla mejorada, y adecuar el riego, la fertilización y los controles sanitarios [49].

Un invernadero puede ser descrito como una estructura protectora, con o sin cortinas laterales bajo la cual se pueden controlar variables como la temperatura, movimiento del aire, humedad relativa, dióxido de carbono, entre otros. La vida útil de los productos cultivados bajo invernadero es mayor que la de los productos cultivados a libre exposición, ya que pueden quedar restos de tierra en los productos. Las partículas de polvo y tierra puede eliminarse con el lavado. La manipulación y magulladuras tiene impacto en la vida útil del producto.

1.8 Cadena productiva de Hortalizas en Colombia

Una cadena productiva tiene como objetivo potenciar el crecimiento a nivel regional de un determinado producto con el fin de poder estar a nivel competitivo en el ámbito

internacional[50]. Según la información consultada en el Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organización de Cadenas (SIOC), instrumento del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR), las cadenas productivas se agrupan en sectores, los cuales son acuícola y pesquero, agrícola, forestal y pecuario. La información obtenida en la página web del SIOC, <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pages/SIOC.aspx>, en la sección “Cadenas Productivas” (Julio 2020) se puede ver de manera condensada en la tabla 1-1. En ella se mencionan las cadenas productivas y se asocian con cada uno de los sectores a los que pertenecen. En el caso del sector agrícola, se listan algunas de las cadenas productivas de este sector.

En el sector agrícola, donde se presenta la mayor cantidad de cadenas productivas en el país, destacamos la cadena productiva de las Hortalizas, por su papel importante en la alimentación humana, ya que aportan vitaminas, calcio, hierro y otros minerales, además, es una cadena donde prima la producción campesina y representa una importante fuente de empleo. Esta cadena comprende cerca de 40 tipos de cultivos, entre los cuales se destacan con mayor área de cosecha: arveja, tomate, zanahoria, y cebolla de bulbo. Los cultivos de tomate bajo cubierta presentan mayor producción en términos de rendimiento (Ton/ha). (SIOC. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Hortalizas/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación promueve el consumo de hortalizas [51]. No obstante, en Colombia su consumo sigue siendo bajo. El DANE reporta que se consumen por persona 38 kilogramos de hortalizas por año, cuando deberían ser 140 kg. Debido a la importancia de las hortalizas, tanto para la salud de las personas, como también en la economía del país, el DANE genera un boletín, indicando buenas prácticas en la producción de estas[52]. Además, el CONPES 113 del 2008, destaca la importancia de una dieta saludable basada en la disponibilidad de alimentos nutritivos y aptos para el consumo. Se enfatiza en el consumo de hortalizas debido a las propiedades nutricionales por ser ricas en vitaminas y minerales[53].

La cadena de producción hortícola de Colombia la conforman productores primarios (agricultores), comerciantes mayoristas y almacenes de cadena, además de la industria de soporte. La encuesta nacional agropecuaria del 2019, hecha por el DANE, muestra una producción de 3.051.481 toneladas de hortalizas, verduras y legumbres, en un área sembrada de 288.212 hectáreas, y un área cosechada de 238.124 hectáreas.

Tabla 1-1: Cadenas productivas en Colombia.

Sector	Cadena productiva
Agrícola	Algunas de las cadenas productivas del sector agrícola son: Aguacate, Algodón, Arroz, Banano, Cacao, Café, Caña de azúcar, Flores, Hortalizas, Guayaba, Maíz, Palma de aceite, Panela, Plátano, Plantas Aromáticas, Mango, Papá, Mora, Fresa, Sábila, Tabaco, Yuca, Ñame entre otros.
Acuícola y Pesquero	Acuicultura y Pesca
Forestal	Caucho, Forestal y Guadua.
Pecuario	Apícola, Avícola, Cárnica Bovina, Cárnica Porcina, Equina y Asnal, Láctea, y Ovino Caprino.

Elaboración propia.

En cuanto al área sembrada, las dos hortalizas con mayor participación en el 2019 en Colombia fueron el frijol (38.1%) y la arveja (13.5%). Estas dos hortalizas también se ubicaron en los primeros lugares del área cosechada con participaciones de 36.4% para el frijol y 14.4% para la arveja. El tomate se ubicó en 9° lugar con una participación del 3.6% en área sembrada y un 3.5% en área cosechada, sin embargo, esta hortaliza tiene la mayor participación en la producción total con un 18.2%. El frijol participó con un 3.8% y la arveja un 4.9%[54]. Con lo anterior se concluye que el tomate en Colombia tiene mayor rendimiento, que las otras hortalizas.

Se estima que la Cadena de Hortalizas genera más de 75.000 empleos directos, además de tener una gran importancia socioeconómica debido a la cantidad de mano de obra familiar y no calificada, asociada a la producción y cosecha de los cultivos[53]. Además, generan cerca de 200.000 empleos indirectos (ver Tabla 1-2), lo cual sumado a los

empleos directos (75.000), representa un 4% del total de empleos en el sector agrícola a nivel nacional. De otro lado, es necesario considerar que el 76% de los predios en los que se cultivan las hortalizas corresponde a propietarios de la tierra, que el 75% de los lotes tienen un área menor a 3 hectáreas y el 40% es menor a una hectárea[55]. Esto muestra que la mayoría de la producción hortícola está en manos de pequeños productores y que además, es una fuente de empleo importante para el país.

Las hortalizas son parte importante tanto de la economía nacional como de la nutrición de las personas, y son cultivadas en 29 departamentos, con más de 600 municipios. Sobresalen cinco zonas de alta producción ubicadas en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Norte de Santander, que producen la mayor cantidad de hortalizas a nivel nacional[53].

Tabla 1-2: Empleo generado en la producción de hortalizas en Colombia.

Hortalizas	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<i>Directo</i>	93.376	87.527	90.733	93.422	101.013	105.359
<i>Indirecto</i>	186.752	175.054	181.466	186.845	202.026	210.718

SIOC, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR).

El plan de desarrollo de Cundinamarca del 2016-2020, uno de los principales departamentos productores de hortalizas, en su programa “Desarrollo Agropecuario con Transformación” tiene dentro de sus estrategias mejorar las condiciones de esta cadena productiva dada su importancia económica y social. Así, el departamento responde a su relevancia agrícola a nivel nacional, y se propone cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible como son Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible. Además, Cundinamarca necesita mejorar la tecnificación en el sector agropecuario para ser más competitiva; y, el cambio climático, la escasa productividad en algunas áreas cultivadas y la escasa utilidad que se genera para el campesino productor han hecho que se tengan en cuenta diferentes estrategias para mejorar el sector agro del departamento[56].

A manera de síntesis se puede afirmar que si bien el área en hortalizas parece relativamente pequeña, esta cadena tiene gran importancia socioeconómica para el país. Además de suministrar importantes nutrientes para la alimentación humana, cuenta con un alto porcentaje de pequeños productores, principalmente de economía campesina, es un subsector en el que se generan grandes cantidades de empleos, y es una fuente de subsistencia para las familias que además de comercializarlas, utilizan parte de la producción para el autoconsumo.

1.9 Agricultura Inteligente en Colombia

Recientemente las Granjas Inteligentes han venido ganando cierta popularidad por el hecho que ayudan al granjero a aumentar la producción en sus cultivos y a mejorar la calidad de sus productos. Como se menciona en un artículo de Libelium, una compañía Española que ofrece servicios de IoT, la Red Tecnoparque Colombia contrató sus servicios para desplegar una WSN en cultivos de Banano en Santa Rosa de Cabal (Risaralda), con el propósito de monitorear variaciones ambientales (humedad, temperatura, radiación solar entre otras) y agronómicas (diámetro del tronco, diámetro del fruto). Esto permitió caracterizar los cultivos en una área concreta, obtener conocimiento sobre el uso de agricultura de precisión, y hacer seguimiento del cultivo, la proyección de cosecha y mejorar el uso del agua (<https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/improving-banana-crops-production-and-agricultural-sustainability-in-colombia-using-sensor-networks/>).

En un artículo del portal agronegocios.com, un experto de la empresa Basf, encargado de la gestión de productos para la agricultura en Colombia y Ecuador, comenta los beneficios de la Agricultura Inteligente, entre ellos la gestión de recursos naturales de manera eficaz; allí se destaca que con el uso de algoritmos de inteligencia artificial se puede detectar presencia de malezas y enfermedades en un 99% (<https://www.agronegocios.co/tecnologia/agricultura-inteligente-una-practica-sostenible-que-permite-gestionar-los-recursos-eficazmente-2775092>).

La empresa “Identidad Technologies” desarrolló un sistema IoT para ser usado en las fincas cafeteras de Chinchiná-Caldas. Este sistema permite la detectar zonas propensas a plagas como la roya y la broca en cultivos de grano, flores y palma de azúcar

(<https://identidadtech.com/over-chinchina-a-coffee-town-in-colombia-the-first-smart-farm-with-iot-technologies-shows-off/>).

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), localizado en Palmira (Valle del Cauca), desarrolló un sistema para que, por medio de un mapa, se pueda consultar información histórica y algunas predicciones sobre temperatura, precipitación y suelos del área seleccionada, ofreciendo a los agricultores una herramienta que les permita tomar decisiones frente las condiciones climáticas (<https://www.contextoganadero.com/agricultura/nueva-tecnologia-ayudara-anticiparse-los-climas-adversos>). El CIAT también ganó un reconocimiento por el desarrollo de una aplicación móvil que ayuda a los agricultores con la gestión de sus granjas, ofreciendo consultas sobre precios históricos, recomendaciones agrícolas y pronósticos meteorológicos (<https://blog.ciat.cgiar.org/international-analytics-award-goes-to-cgiar-centers-for-sustainable-agriculture-tools/>).

Un investigador de la Universidad de Los Llanos en Colombia desarrolló un sistema para el monitoreo variables ambientales en los cultivos en la granja de esa institución. Este sistema estaba construido usando una WSN, y una aplicación Web para el usuario final, los integrantes de un grupo de investigación[57]. De otro lado, en la universidad de Pamplona se construyó una WSN para medir la temperatura y humedad en cultivos de fresa en el municipio de Pamplona (Norte de Santander). La WSN fue construida con dispositivos Xbee, uno de los cuales era el coordinador, encargado de recibir la información, y comunicarse con un PC por medio del puerto serial para guardar la información en una base de datos, usando el programa Matlab. Por último, una aplicación Web ofrece diferentes servicios, usando la información registrada en la base de datos[58].

Estos ejemplos de Agricultura Inteligente muestran como por medio de las TIC, y con el relativo bajo precio de diferentes dispositivos de comunicación inalámbrica, sensores y otras plataformas de desarrollo, se pueden construir herramientas de utilidad para el sector del agro. En aspectos climáticos, se destaca el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa. La revisión realizada también evidenció que han realizado proyectos de Agricultura Inteligente para una amplia variedad de productos agrícolas.

Los dispositivos seleccionados mencionados en la sección 1.5 son fáciles de usar, y existe gran cantidad de información en internet sobre cómo usarlos y realizar proyectos *DIY* (*do it yourself*) o hágalo usted mismo, ya que para usar la mayoría de estos dispositivos basta

con conectarlos a un computador personal, abrir un entorno de desarrollo, y ejecutar unas cuantas líneas de código, las cuales abundan los ejemplos en internet y se cuenta con el soporte de una comunidad, en la mayoría de ocasiones, dispuesta a ayudar.

Se puede afirmar que existen en Colombia amplias oportunidades para desarrollar e implementar sistemas de granjas inteligentes, pero se deben considerar principalmente dos aspectos. El primero tiene que ver con la inversión inicial en sensores y otros dispositivos necesarios para la construcción de WSN, y la segunda, con el acceso a las redes que permitan la transmisión de la información para luego guardarla y gestionarla. Sensores que miden las mismas variables, difieren notablemente en sus precios, en función de la precisión e intervalos de valores, el modelo y la marca, tal es en el caso de los sensores DHT22 y DHT11. Según la documentación encontrada en <https://www.adafruit.com/> para estos, el sensor DHT22 tiene una precisión del $\pm 0.5\%$ para medir temperaturas; en cambio, la precisión del sensor DHT11 para medir temperaturas es $\pm 2\%$. Los costos aproximados en junio del 2021 son de 4.5 USD para el DHT22 y de 2.1 USD para el DHT11.

Por todo lo anterior, para la elección de un sensor se deben tener en cuenta las variables a medir, rango de medición, la precisión y el presupuesto disponible.

2. Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos del proyecto fue necesario realizar una serie de actividades de manera sistemática y secuencial, como se describe en esta sección. Luego de la revisión de literatura y dado que se planteó un ensayo experimental, se seleccionó la especie (tomate), se definieron las variables climáticas a evaluar, se diseñó la red de sensores para el muestreo en campo y se buscó y escogió una granja para el ensayo. Posteriormente se diseñó y definió el sistema para el manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero, como acercamiento a la Agricultura Inteligente, que consta de: la plataforma, la red de sensores y el envío de los datos capturados por estos para su procesamiento. A continuación se detalla la metodología seguida para el presente estudio.

2.1 Diseño del sistema para el manejo de datos climáticos

2.1.1 Selección del cultivo y descripción de este

- Evaluación y selección de la especie

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario seleccionar una especie con la cual adelantar la parte experimental, esto es, las pruebas de campo para evaluar el sistema de toma de datos climáticos. Para el efecto, a partir de la revisión realizada de la cadena de hortalizas se consideró comparar dos especies hortícolas de interés socioeconómico para el país, comunes en zonas geográficas cercanas a Bogotá y que se cultivan bajo invernadero. Las especies seleccionadas para la comparación fueron el tomate (*Solanum lycopersicum*) y la habichuela (*Phaseolus vulgaris*) (ver tabla No. 2-1). Estas hortalizas además se destacan por su contenido nutricional ya que aportan, vitaminas A y C, hierro y proteínas.

Los aspectos tenidos en cuenta para comparar las especies fueron la producción total (toneladas), el rendimiento (toneladas por hectárea), la ubicación geográfica de cultivos y su consumo. La producción total y el rendimiento se asocian con la

importancia de la especie en la cadena productiva; la ubicación geográfica está relacionado con la distancia necesaria para desplazarse desde Bogotá y realizar la parte experimental del proyecto.

En la tabla 2-1, se presentan los datos de área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento para el tomate y la habichuela en el 2017. Esta información no discrimina si los cultivos estuvieron bajo invernadero o a libre exposición. Se listan los cinco primeros departamentos, ordenados de manera descendente según el área cosechada.

La información fue obtenida en la página web de Agronet (MADR) que brinda la información y comunicación del sector agropecuario. Para el caso del tomate, los datos se obtienen de https://www.agronet.gov.co/Documents/9-TOMATE_2017.pdf, y para el caso de la habichuela, los datos se obtienen de la URL http://www.agronet.gov.co/Documents/16-HABICHUELA_2017.pdf, ambos consultados a Julio del 2020. Se consultó dicha información en Agronet, con el fin de obtener información oficial que permita realizar una comparación adecuada de estos aspectos entre las dos especies.

Tabla 2-1: Comparación de variables por cada especie a evaluar.

Especie	Altura (M.S.N.M)	Departamento	Áreas Sembrada y cosechada (ha)	Producción y Rendimiento (t/ha)
Tomate	Entre los 800 a 2400[59]	Antioquia, Santander, Norte de Santander, Cundinamarca, Valle del Cauca	Área Sembrada 6.500 ha, Área Cosechada 5.978 (ha)[60],	Producción 162.611 t, Rendimiento 27,20 t/ha[60]

Habichuela	Entre los 1300 a 2000[61].	Cundinamarca, Valle del Cauca, Santander, Huila, Nariño	Área sembrada 6.838 h, Área cosechada 6.584 ha[62].	Producción 56.651 t, Rendimiento 8.60 t/ha[62].
------------	----------------------------	---	---	---

Elaboración propia.

El tomate tiene gran importancia a nivel nacional, tanto en cultivos bajo invernadero, así como a libre exposición. La habichuela, en el 2018, se ubicaba en 7° lugar en cuanto a mayor área cosechada de hortalizas a nivel nacional (6%) con un total de 6.674 ha, superada por el tomate que presentó un 15%, lo que corresponde a un total de 15.881 ha y lo ubicaba en segundo lugar en área cosechada a nivel nacional. De otro lado, el cultivo de tomate bajo invernadero puede obtener un rendimiento por unidad de área de hasta 90 t/ha[63], que supera considerablemente el de habichuela.

Las dos especies son producidas en el departamento de Cundinamarca, lo cual es un punto a favor a considerar, ya que el proyecto se está realizando con base en la ciudad de Bogotá.

En Colombia se reporta que la hortaliza de mayor consumo humano es el tomate, seguida por la cebolla de bulbo, la zanahoria, y un par de lugares más atrás se encuentra la habichuela. A nivel mundial, el tomate tiene el 30% en la producción de hortalizas, seguida por coles y pepinos cada una con el 13%. Junto con las cebollas, las coles y los pepinos son las hortalizas más comercializadas con el 40% de la producción mundial[55].

Aunque la habichuela presenta áreas sembradas ligeramente mayores frente a las del tomate, este último presenta mayor producción debido al rendimiento en toneladas por hectárea, además es una hortaliza que tiene una alta demanda de consumo a nivel nacional e internacional, y se pueden ubicar cultivos cercanos a Bogotá. Por estas razones, se seleccionó el tomate bajo invernadero como especie para desarrollar el trabajo experimental de campo.

- Aspectos agronómicos del tomate (*Solanum lycopersicum*)

Posterior a la selección de la especie, se procedió a realizar un estudio sobre esta según los objetivos del proyecto. A continuación se presenta una breve revisión de temas agronómicos relacionados con el tomate que se consideran relevantes para el proyecto, entre ellos algunas generalidades, la descripción botánica, aspectos fisiológicos, las variedades del tomate cultivadas en el país, y las enfermedades que lo atacan teniendo en cuenta los posibles efecto del clima.

- Generalidades del tomate: Su nombre científico es *Solanum lycopersicum*. Es una hortaliza de la familia de las solanáceas, con una raíz principal y otras adyacentes. Tiene un tallo que es continuación de la raíz. La producción de hojas en el tomate varía según el hábito de crecimiento. Necesita una temperatura entre los 15 y 25°C, y una humedad relativa entre el 60 y el 80%. Se adapta al rango de pH del suelo entre 6 y 7, y presenta gran susceptibilidad a heladas y exceso de agua [6].

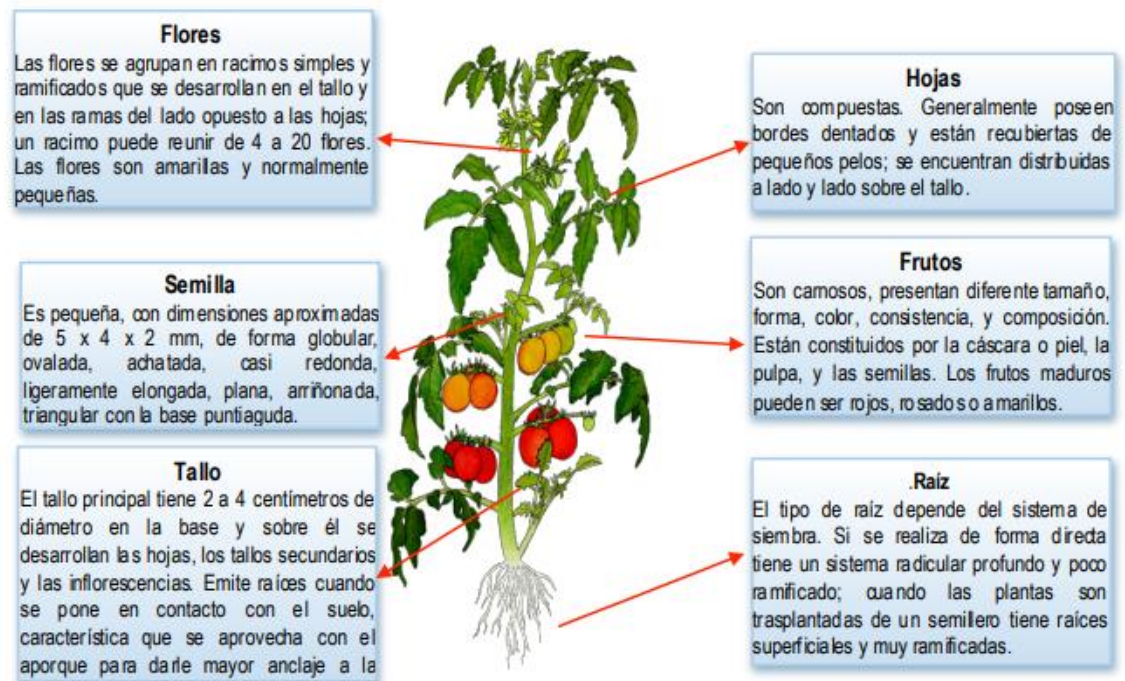
Esta hortaliza tiene una considerable participación económica a nivel nacional e internacional gracias al valor económico de su producción, a su amplio consumo, y debido al área cosechada. Además, el tomate es de gran importancia nutricional, ya que tiene vitaminas A y C, y sustancias antioxidantes como licopeno y betacaroteno[64].

En Colombia los cultivos de tomate se encuentran entre los 800 y 2.400 msnm, y pueden estar bajo invernadero, con semicubiertas o a libre exposición. La temperatura oscila entre los 15 y 32°C. Según el DANE, las precipitaciones están en el rango de 1.500-2.500mm de lluvia al año (DANE. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/Bol_Insumos_sep_2019.pdf).

- Algunos aspectos fisiológicos del tomate: Su fruto está compuesto en un 94% por agua, el otro 6% está formado por constituyentes orgánicos, los cuales le dan el sabor y textura características[64]. En la figura 2-1 se pueden ver las partes de una planta de tomate común. Como todas las plantas, el tomate requiere para su correcto desarrollo un cierto rango de temperatura en cada una de las fases de crecimiento. A. Vallejo indica

que las temperaturas fuera del rango de los 20-25°C retrasan la germinación. Tanto la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad, son variables que tienen gran impacto sobre el desarrollo del tomate en todas sus fases[17]. Por otra parte, en el “Manual Tomate” de la Cámara de Comercio de Bogotá, se especifica que el tomate necesita diferentes rangos de temperatura según la hora; en el día necesita entre 20-25°C; mientras que en la noche requiere una temperatura mínima de 8°C. Temperaturas inferiores debilitan la planta y pueden causar la muerte. Temperaturas mayores a 32° pueden generar la toma excesiva de nutrientes por parte de la planta lo que conduce al agotamiento de la planta y desordenes fisiológicos[64].

Figura 2-1: Descripción botánica y morfológica del tomate.



Corpoica, 2007

La humedad relativa que se recomienda para un óptimo desarrollo, debe estar entre el 60% y el 85%, y debe tener entre 6 y 8 horas de luz [6]. Cuando la humedad relativa presenta valores altos, y se presentan determinados rangos de temperatura, se pueden ver favorecidos ciertos patógenos causantes de enfermedades, como será descrito más adelante.

- **Variedades del Tomate:** Las principales variedades del tomate cultivadas en el país son milano, larga vida, chonto y cherry. El peso promedio del tomate Milano está entre los 200 y 400 g, es una de las variedades más grandes y su valor comercial puede considerarse alto. Se usa principalmente en ensaladas y tiene susceptibilidad a enfermedades.

El tomate fresco larga vida tiene una conservación prolongada; fue producido por medio de ingeniería genética y tarda más tiempo en madurar. De otro lado, la variedad de tomate chonto es utilizado en la preparación de guisos, ensaladas y pastas. Los frutos tienen un peso entre 70 a 220 g. Por su parte, el tomate tipo Cherry presenta frutos de tamaño pequeño, con un peso promedio de 10 g, de sabor dulce; son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura, pueden ser de color rojo, naranja o morado. Se consumen frescos y en pasabocas[6].

- **Enfermedades del tomate**

En la tabla 2-2 se describen las principales enfermedades que afectan al tomate, mencionando características relevantes y el posible efecto de las variables temperatura y humedad relativa. La información ha sido obtenida de los capítulos relacionados con las enfermedades del tomate, en los libros “Manual Tomate”[6] y “Manual de Producción de Tomate Bajo Invernadero”[64].

Tabla 2-2: Principales enfermedades del tomate.

Enfermedad	Características relevantes y posibles efectos de variables climáticas
Cáncer Bacterial (<i>Clavibacter michiganensis</i> (Clase: Thallobacterias)):	Es una enfermedad esporádica en los cultivos de tomate. Se doblan las hojas más viejas y se presenta una necrosis de los folíolos. Esta enfermedad puede desarrollarse en humedades relativas mayores al 80% y en temperaturas de 18 a 24°C. Se pueden llegar a formar estrías oscuras que van desde el peciolo hasta donde se unen con el tallo. Los tejidos vasculares del tallo

	muestran rayas amarillas o pardas, y generan incluso raíces adventicias sobre el tallo.
Marchitamiento bacterial (<i>Ralstonia solanacearum</i> (<i>Pseudomonas solanacearum</i>)(Fam: Pseudomonadaceae))	Se presenta en climas cálidos. Es una bacteria común en suelos húmedos y livianos. Se desarrolla en temperaturas de 25°C. Los síntomas empiezan con flacidez en las hojas, hasta llegar a un marchitamiento en la planta. Se puede llegar incluso a presentar pudrición y esto ocasionar ahuecamiento en el tallo.
Peca Bacteriana (<i>pseudomonas syringae</i> pv. <i>tomato</i>):	Esta enfermedad se puede presentar cuando exista alta humedad relativa y una temperatura promedio de 20°C. Una manera de identificar esta enfermedad es que los frutos se presentan puntos necróticos. Las manchas de la peca bacteriana pueden volverse agujeros en el centro de las lesiones, las cuales se pueden notar más en la superficie inferior de las hojas.
Gota	Enfermedad altamente destructiva en zonas de clima medio y frío. Se puede presentar en humedades relativas mayores al 91%. El crecimiento de esta enfermedad se puede inhibir con temperaturas menores a 30°C en ambientes secos. . Empieza con lesiones(manchas) en las hojas, hasta propagarse al fruto a tal punto que es invadido. Es causada por <i>Phytophthora infestans</i> , un hongo que puede atacar las hojas, el fruto, el peciolo, y el tallo, es decir puede atacar cualquier parte de la planta.

<p>Moho gris (<i>Botrytis cinerea</i>(Orden: Helotiales)):</p>	<p>Es una enfermedad muy común en los invernaderos. Los factores que ayudan a que se desarrolle esta enfermedad son alta humedad relativa y temperaturas entre 15 y 22°C. Se puede manifestar con la decoloración y humedecimiento de los tejidos. Con una humedad relativa alta se puede llegar a presentar un moho de color gris, en la cual se encontrarán muchas esporas del hongo. Básicamente consiste en manchas foliares, y lesiones en el tallo, fruto y las flores.</p>
<p>Mildeo polvoso (<i>Oidium neolycopersici</i> o <i>Erysiphe po-lygoni</i>(Orden: Erysiphales)):</p>	<p>Es común en climas cálidos y secos, se puede también encontrar en climas fríos. Este hongo se desarrolla cuando la humedad relativa está entre un 50 y 70%, y las temperaturas entre un 20 y 25°C. Es una enfermedad común y fácil de reconocer, pues se manifiesta como manchas blancas y polvosas en las hojas. Estas manchas pueden diseminarse fácilmente con la lluvia o el viento. Si no existe una condición nutricional favorable, se pueden generar cleistotecios. Este hongo, consume los nutrientes de la planta, reduce la fotosíntesis, aumenta la respiración, y puede llegar a reducir los rendimientos hasta en un 40%.</p>

Elaboración propia a partir de diferentes fuentes

Se concluye que las enfermedades del tomate tienen comportamientos diferenciados frente a las variables humedad relativa y temperatura, pero en general se pueden ver incrementadas en condiciones de alta humedad relativa y comúnmente en el rango entre 15 y 30°C.

- Clima al interior de un invernadero para el cultivo de Tomate

La producción del tomate bajo invernadero puede llegar a superar el 300% respecto a la producción de tomate a libre exposición, alcanzando entre 5 y 8 kg por planta de tomate cultivada bajo condiciones protegidas, mientras que se obtienen entre 1.5 y 2 kg en cultivos a libre exposición. Esto se debe a que en el invernadero las condiciones adversas del ambiente pueden ser minimizadas y las favorables potencializadas, beneficiando la productividad, calidad y rentabilidad del cultivo[52].

Los aspectos climáticos son particularmente importantes para el adecuado desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos de tomate bajo invernadero. La temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la humedad del suelo son variables que influyen en la producción del cultivo en un invernadero y su microclima. La temperatura es una de las variables climáticas que se modifica en el invernadero, y está influenciada por la radiación solar, el diseño, el tamaño de las ventilaciones y la altura del invernadero, la temperatura externa y la dirección del viento[64]. Una investigación realizada por el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) en La Habana Cuba, relacionada con los efectos que las altas temperaturas tienen sobre los cultivos de tomate, sugirió que la temperatura en el día debe estar entre 25 y 30°C, y de 20°C en la noche[65].

El control de la temperatura, el flujo del aire y la humedad relativa dentro de un invernadero generan mejores condiciones climáticas que favorecen el crecimiento de los cultivos, y su sanidad[47]. Si la temperatura está fuera del rango óptimo se pueden presentar problemas en el desarrollo, crecimiento y rendimiento de la planta, que pueden llegar a ser irreversibles, comprometiendo la producción y calidad del producto. En cada una de las fases de crecimiento y desarrollo existe un rango de temperatura recomendado según sea de día o de noche[17]. El impacto de la temperatura se ve reflejado también en la aparición del fruto, la aparición y la absorción de flores, y en el crecimiento del cultivo[64]. Además, como se mencionó anteriormente, las enfermedades tienen un mayor desarrollo bajo ciertas condiciones ambientales. En cada variedad de tomate, en cada una de sus fases, y dependiendo si

es de día o de noche, se necesita de una temperatura adecuada para que el producto tenga la cantidad y la calidad adecuadas.

La altura del invernadero tiene influencia en la producción. En un estudio con hierbas aromáticas se comparó la producción de 3 invernaderos con diferentes alturas, encontrando que los invernaderos con menor altura reportaron mayor producción, y esto fue asociado a que a menor altura del invernadero se aumenta la temperatura [66]. De otro lado, la humedad en el aire o humedad relativa está influenciada por la ventilación y la condensación en la cubierta del invernadero. La evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas también modifican la humedad relativa así como la temperatura en el invernadero[64].

En un estudio para estimar la duración de humedad de hoja, en cultivos de tomate bajo invernadero, se calibró un modelo denominado SWEB (Surface Wetness Energy Balance): en este se concluyó que aunque el modelo, luego de su calibración, puede ayudar a detectar periodos con agua libre en el dosel, se recomienda mejorar el clima de los invernaderos en las horas de la noche, removiendo el vapor de agua y aumentando la temperatura, así se disminuirá el ataques de enfermedades fúngicas[67].

La polinización, que resulta fundamental para una adecuada producción, también se ve afectada por el microclima del invernadero. En un estudio para mejorar la producción de tomate bajo invernadero, por medio del mejoramiento del proceso de polinización, se determinó el rango entre las 7 am y 9 am como las horas óptimas para realizar las prácticas de polinización, ya que la humedad relativa se encontraba entre el 65 y 85%. Los autores concluyeron que la temperatura y la humedad relativa son variables claves para tener un mejor resultado en la polinización y por ende en la producción[68].

Durante el desarrollo de un sistema para el monitoreo de temperatura y humedad del suelo en un invernadero de tomate riñón, se concluyó que debido a que el tomate es una planta que requiere mucha agua, se recomienda que el suelo presente una humedad entre el 70-80% de capacidad de campo. Valores por debajo de este rango

pueden generar que el fruto no se desarrolle correctamente y valores por encima de este rango pueden generar que los frutos se rajen y tengan mala calidad en el sabor[69]. Ese estudio y otros reportados en la literatura también muestran que el suelo para la producción del tomate bajo invernadero requiere buen drenaje para evitar que se acumule agua en exceso[6]. Si bien el tomate requiere considerable cantidad de agua para su adecuado desarrollo, los niveles altos de humedad cerca de las raíces generan problemas como crecimiento lento, floración tardía, menor cuajado de los frutos, entre otros. De hecho, el tomate puede crecer en suelos arenosos o con tendencia a ser secos, siempre y cuando la humedad del suelo pueda ser mantenida[70].

2.1.2 Selección de las variables climáticas

A partir de la revisión realizada y considerando el efecto de clima en el crecimiento, el desarrollo, la presencia de enfermedades y la producción del tomate, se definieron como variables para el ensayo experimental: temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. A partir de estas variables, se deben definir alertas al productor de posibles situaciones indeseables para su cultivo.

En la tabla 2-3 se listan las enfermedades del tomate y los valores de las variables climáticas temperatura y humedad relativa que las favorecen. Esta tabla fue construida a partir de la información que se muestra en la tabla 2-2.

La tabla 2-3 muestra que los rangos de temperatura y humedad relativa que favorecen la presencia de enfermedades en el cultivo de tomate varían dependiendo del tipo de enfermedad. En general, el riesgo es bajo para temperaturas inferiores a 15°C y humedades relativas menores a 50%, y además, a temperaturas superiores a 25°C se tienden a inhibir las enfermedades. Dependiendo de la(s) enfermedad(es) predominante(s) en el cultivo en la zona correspondiente se deben definir los intervalos de confianza de temperatura y de humedad relativa para establecer alertas. En un momento dado se deben establecer los rangos de temperatura y de humedad relativa que de manera conjunta favorecen la presencia de una enfermedad.

Tabla 2-3: Rangos de variables climáticas que favorecen la presencia de enfermedades en el cultivo de tomate

Enfermedad	Rangos de variables climáticas (temperatura y humedad relativa)
Mildeo polvoso	Humedad relativa entre un 50 y 70%, y temperatura entre 20 y 25°C.
Moho gris	Alta humedad relativa y temperatura entre 15 y 22°C.
Peca Bacteriana	Alta humedad relativa y temperatura promedio de 20°C.
Gota	Humedades relativas mayores al 91% y temperatura menor a 30°C.
Marchitamiento bacterial	Suelos húmedos, temperaturas de 25°C.
Cáncer bacterial	Humedad relativa mayor al 80% y temperatura de 18 a 24°C.

En este proyecto se consideró que para un correcto desarrollo del cultivo de tomate bajo invernadero la temperatura debe estar en el intervalo de 20-25°C y la humedad relativa entre el 60 y el 80%. Pero debe tenerse en cuenta que la mayoría de las enfermedades que se presentan en el cultivo ocurren en rangos de temperatura entre 15°C y 25°C, y humedades relativas superiores al 85%, por lo cual se establecieron alarmas en el sistema cuando alguna de la variables (o ambas) alcanzan esos rangos. De otro lado, en el caso de la humedad del suelo, la alerta se definió al 50% de la capacidad del campo del suelo, considerando que es el momento de regar.

2.1.3 Ubicación del cultivo y selección del invernadero

Se buscó información de productores de tomate bajo invernadero, con producción activa, y que estuvieran en disponibilidad de apoyar los ensayos en cercanías de Bogotá. Se contactaron varios productores y al final se seleccionó un invernadero ubicado en la vereda Rionegro del municipio de Ubaque, en Cundinamarca. El invernadero puede verse en la figura 2-2, imagen tomada de Google maps.

Figura 2-2: Vista aérea del invernadero.



Elaboración propia, imagen tomada de Google maps.

Este invernadero tiene como medidas de 40m x 90 m, y una altura máxima de 5m y mínima de 4.5m Durante la primera visita (Noviembre 2020) el tomate se encontraba en la fase de desarrollo del fruto (esto puede verse en las figuras 2-3 y 2-4). Se evidenció disponibilidad e interés por parte de la persona a cargo para apoyar los ensayos. El tiempo empleado para el desplazamiento en automóvil desde la ciudad de Bogotá es de 2.5 horas.

Figura 2-3: Interior del invernadero seleccionado.



Elaboración propia.

La persona a cargo del invernadero indico, durante una entrevista que se le hizo como parte del análisis y del levantamiento de requerimientos, que la siembra se realizó hacia agosto del 2020, y en noviembre siguiente se empezó a cosechar, realizando cortes cada dos semanas aproximadamente.

Estos cortes fueron realizados hasta mediados de Febrero del 2021. Otras actividades que se realizaban eran ventilación por medio de cortinas, riego y controles sanitarios (controles de enfermedades, insectos plaga y malezas).

Figura 2-4: Planta de tomate en el invernadero seleccionado.



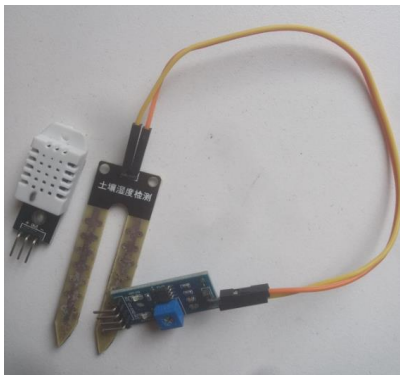
Elaboración propia.

2.1.4 Selección de plataforma y sensores

Primero se seleccionó la plataforma y luego, dentro de los sensores disponibles y compatibles con la plataforma seleccionada, se eligieron los sensores según las variables a medir, el rango de medición, el microprocesador y el precio de los sensores. Esto último considerando que en los términos del proyecto se deben usar equipos de bajo costo. También se tuvo en cuenta que los sensores presentaran facilidad de uso y disponibilidad en el mercado.

- Selección de la plataforma: Se contemplaron dos opciones muy populares y disponibles en el mercado, Arduino y Raspberry. Se seleccionó Arduino como la plataforma base para soportar la programación y lectura de la información obtenida por los sensores debido a los casos de éxito que esta plataforma ha tenido en la implementación de soluciones de *Granjas Inteligentes*, algunos citados previamente; adicional a estas razones, se destaca el hecho de ser un dispositivo de menor costo que Raspberry y es descrito en su página web como una plataforma fácil de usar, que tiene versiones para varios sistemas operativos.
- Referencias de sensores: Algunos de estos fueron mencionados como sensores de uso común, en el artículo que trata sobre el modelo arquitectura de Granjas Inteligentes[32]. La tabla 2-4 presenta una lista y breve descripción de los sensores que se decidieron utilizar. Para la medición de temperatura y humedad relativa se seleccionó el sensor DHT22. El sensor FC-28 fue seleccionado para medir la humedad del suelo. En la figura 2-5 se puede ver el sensor DHT22 a la izquierda y el FC-28 a la derecha.

Figura 2-5: Sensores seleccionados



Elaboración propia.

Tabla 2-4: Características de los sensores elegidos.

Sensor	Usos y Observaciones
DHT22	<p>Temperatura y humedad relativa. Se puede comprar aproximadamente en 9 USD. Es compatible con Arduino y Raspberry.</p> <p>Requiere de 3-5V, es digital.</p> <p>Permite medir la humedad relativa en el rango de 0-100%, con una exactitud del 2-5%.</p> <p>En temperaturas, tiene una exactitud de +/-0.5% en el rango de -40 hasta 80°C.</p> <p>Más información en https://www.adafruit.com/product/385</p>
FC-28	<p>Es un sensor que permite medir la humedad del suelo, es compatible con Arduino, tiene un costo aproximado de 2 USD, y ha sido usado en sistemas sencillos de riego automático. Requiere 5V para su funcionamiento. Con este sensor, la humedad del suelo se mide por variación de la conductividad mediante los dos electrodos que se insertan en el suelo. Los valores reportados son de tipo cuantitativo, desde cero (sensor sumergido en agua) hasta 1023 (sensor en el aire), pero su interpretación se hace mediante rangos: suelo seco a valores entre 800 y 1023, suelo ligeramente húmedo entre 600-700; este sensor es de uso común en los proyectos de granjas inteligentes según [32] y uno de características similares fue utilizado en la construcción de sistema de granjas inteligentes en la India[20]. Otros criterios de selección para este proyecto fueron su bajo costo y simplicidad de uso. Se asume que el rango completo para suelo húmedo está entre 0-599; para el</p>

	<p>caso del intervalo entre 701 y 799 se asume como suelo ligeramente húmedo.</p> <p>Más detalles se pueden encontrar en https://naylorpmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/47-sensor-de-humedad-de-suelo-fc-28.html y en https://www.luisllamas.es/arduino-humedad-suelo-fc-28/.</p>
--	--

Fuente propia, a partir de información consultada en varias fuentes.

- Selección del transceptor: La transmisión de la información desde los nodos hasta el gateway se debe hacer de manera inalámbrica. Existen varios protocolos y dispositivos que soportan la transmisión de información de manera inalámbrica. Se evaluaron varias opciones, pero debido al costo, dispositivos como Zigbee (40 USD) o LoRa (6.5 USD) fue descartados. Entonces, se decidió utilizar del transceptor nRF24L01. Las versiones más económicas en el mercado están desde los 1.5 USD, es compatible con Arduino, y algunas versiones que incluyen una antena pueden enviar la información hasta 1 Km o más dependiendo de factores como si es un espacio abierto y si hay obstáculos, entre otros. Se puede encontrar información de este dispositivo con más detalle en la página https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf.
- Diseño de los nodos y la estación base: Cada nodo debía tener como mínimo un dispositivo Arduino, una fuente de energía, un transceptor, y al menos un sensor. Para el envío de la información desde el Gateway o estación base directamente hacia internet se consideraron dos opciones, Ethernet o Wifi. Se seleccionó esta última por dos razones: la facilidad para cambiar la ubicación de la estación según fuera necesario sin estar dependiendo del cable ethernet, y además, los shield ethernet para Arduino están quedando descontinuados y hasta obsoletos.

Diversos dispositivos compatibles con Arduino y similares plataformas han sido construidos con el chip ESP8266, el cual es de bajo costo, permite la conexión a redes WiFi, y su programación no es compleja. Puede verse más información en <https://www.sparkfun.com/products/13678>. Uno de estos dispositivos es NodeMcu, una plataforma de hardware y software que se usó principalmente para el envío de los datos obtenidos con los sensores hacia internet.

Raspberry fue considerado como la primera opción para construir la estación base, pero fue descartado cuando se comparó con NodeMcu y se verificó que este último contiene las funciones necesarias para el desarrollo de este proyecto; su costo es bajo (5.2 USD) si se compara con el costo de Raspberry (desde 60 USD aproximadamente).

2.1.5 Diseño del muestreo

Las condiciones climáticas al interior del invernadero, aunque sin variaciones considerables, distan de ser homogéneas, por lo cual se decidió hacer muestreos de las variables temperatura, humedad relativa y humedad del suelo en diferentes sitios de este. Entonces se decidió realizar un muestreo estratificado, en cuatro zonas (esto por la cantidad de nodos disponibles), definiendo un nodo por zona. En cada uno de estos se ubicaron sensores a 2 alturas diferentes para tomar las medidas de temperatura y humedad relativa (sensores DHT22), y un sensor para medir humedad del suelo (sensor FC-28). La figura 2-6 muestra la división del invernadero en las cuatro zonas. En cada una de las zonas, se ubicaría un nodo. El primer nodo fue ubicado en la zona, que según la persona a cargo del invernadero, se presentaba mayor humedad en el suelo. Las otras ubicaciones de los nodos fueron la cercanía de una llave para riego, una zona con presencia de mayor temperatura y la otra un punto aleatorio.

Figura 2-6: Vista área del invernadero, con la división de las cuatro zonas para el muestreo.



Elaboración propia.

2.1.6 Topología de la red

Para minimizar las posibles pérdidas de información, se decidió construir la WSN con topología estrella; se escogió esta topología por su baja latencia, su sencillez y facilidad en el desarrollo y despliegue [71]. De esta manera, en caso de presentarse alguna falla en cualquiera de los nodos, solo se perdería la información del nodo que estuviera fallando.

Por otra parte, la librería utilizada para programar el envío de información en los nRF24L01 soportaba un máximo de 32 bytes por evento de escritura en el canal, y el tamaño de la información recopilada por los sensores que se enviaba por cada evento era de 24 bytes (arreglo de 6 números en punto flotante, cada uno con un tamaño de 4 bytes); por lo tanto, era necesario evitar la saturación del canal con información redundante.

2.1.7 Selección de componentes de Software

Fue necesario categorizar el software a desarrollar, por lo que se agrupó el software con funciones comunes. El resultado fueron tres categorías así: software para controlar la

lectura de los sensores y la programación del transceptor (software para Arduino), software para el procesamiento y gestión de la información, y software de aplicación que consiste de los programas a ejecutar por el usuario final.

- **Software para Arduino:** Se compone de todas las librerías, programas y firmware requeridos para la configuración y funcionamiento de los sensores, transceptor y demás componentes que junto con Arduino se usan para recolectar y transmitir la información de las variables climáticas. Las librerías que se usaron son básicamente para el control de los sensores, la gestión de los transceptores y la comunicación con la capa de servicios.
- **Software para procesamiento de información:** Se incluye en esta categoría todo el software y componentes de software que se requieren para guardar los datos obtenidos en la capa de sensores. Se creó un proyecto en Firebase, el cual permite generar una base de datos en tiempo real. De esta manera, los datos recibidos desde la capa de red, se guardan y están disponibles para ser consumidos por aplicaciones Web, aplicaciones móviles o apps y por medio de servicios REST en caso que sea requerido.
- **Software de aplicación:** Software utilizado para consultar la información procesada. Básicamente es todo el conjunto de software que se usa para el desarrollo de la app que el usuario final utilizará para monitorear el invernadero. En esta categoría se ubica la plataforma Flutter que se empleó para el desarrollo de una aplicación para dispositivos Android, utilizada para mostrar las notificaciones de alerta. También los componentes necesarios para la construcción del cliente WEB con el cual se permite monitorear la actividad en el invernadero.

2.2 Construcción e integración de los componentes

La arquitectura para el desarrollo de granjas inteligentes, descrita en la sección 1.4.1, fue seleccionada como la arquitectura del sistema para el manejo de datos climáticos, cuya construcción es el objetivo de este proyecto.

Luego de seleccionar la plataforma, los sensores, y demás componentes, cada una de las capas de la arquitectura se fue construyendo de manera secuencial, empezando por la capa de sensores, y realizando las correspondientes pruebas unitarias e integrales. pruebas integrales.

Como fuente de alimentación, tanto para los nodos sensor, como para la estación base se seleccionaron baterías recargables AA de 1.2 V Ni MH, conectadas en serie para conseguir el voltaje necesario. La selección de las baterías recargables se hizo por dos razones: economizar recursos y ser amigables con el medio ambiente. Se espera que con el tiempo se recupere la inversión de las baterías recargables.

2.2.1 Construcción de la red de sensores

Para la construcción de la red de sensores, primero se verificó la precisión de los sensores DHT22 que habían sido adquiridos, ya que entre otras razones, se tenían por lo menos dos marcas diferentes. Para verificar la precisión, se tomaron medidas de temperatura y humedad relativa en 4 ambientes diferentes con 9 sensores y con el equipo *Ambient Weather WM-4* (<https://ambientweather.com/amwm4.html>). Imágenes del *WM-4* y de los sensores DHT22 se pueden ver en la figura 2-7.

El primer ambiente fue en el exterior de la vivienda, el segundo ambiente dentro de la vivienda, el tercer ambiente una zona húmeda de la vivienda, y el cuarto ambiente fue de una nevera de icopor con algunos cubos de hielo adentro. Los datos pueden ser consultados en las tablas del anexo titulado "Datos Ambientes en Calibración de los Sensores".

Figura 2-7: Sensores DHT22 y WM-4.

Elaboración propia.

A cada nodo se le asignaron los sensores, que fueron programados específicamente para el nodo y también se les asignó un dispositivo nRF24L01 configurado como emisor.

Adicional a los datos de las variables climáticas fue necesario usar una variable para identificar el sensor y el nodo al que pertenecía, de manera que en cada evento de transmisión de información eran enviados las mediciones de los sensores, con la información del nodo al que pertenecían, y el tiempo en que era recibidos por el Gateway (hora, minuto y segundo). Se estimó un retraso de 2 segundos aproximadamente entre el momento en que se recibía la información del nodo y el momento en que se guardaba en Firebase.

2.2.2 Gestión de la información

Para la gestión de la información, es decir para realizar las tareas de almacenamiento y recuperación de la información, se decidió utilizar como base de datos la Firebase Realtime Database, por las características que se mencionaron en la sección 1.6. Para

poder realizar la escritura de la información en esta base de datos, se requirió un cliente firebase y una conexión a internet.

2.2.3 Construcción de componentes software

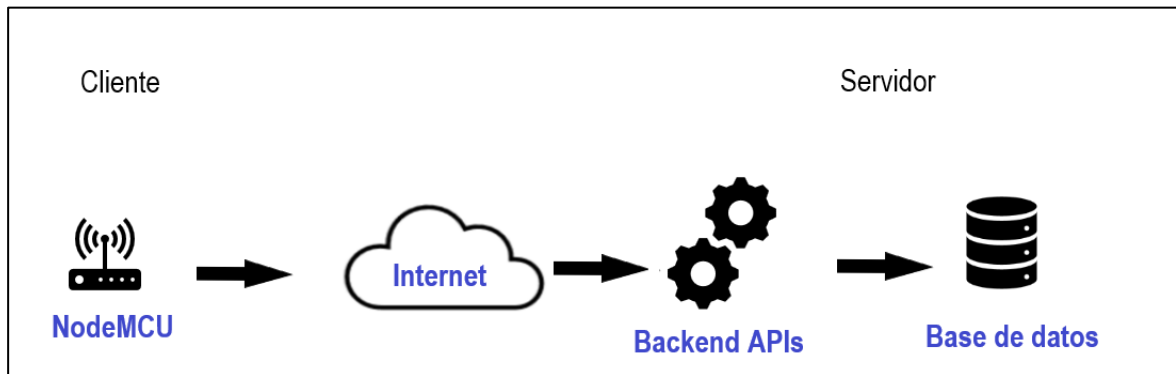
En resumen, las etapas del desarrollo de software se llevaron a cabo de la siguiente manera. El análisis, consistió en el levantamiento de los requerimientos, esto es identificar las necesidades del usuario para medir las variables climáticas. En el diseño se identificó modelo de datos y la arquitectura para las aplicaciones; se realizaron cuatro iteraciones, hasta conseguir el sistema software que era requerido. Para finalizar, se desarrollaron las aplicaciones, y se realizó el despliegue y pruebas de cada aplicación.

Los requerimientos para el desarrollo de las aplicaciones fueron obtenidos por medio de varias *historias de usuario* (ver Anexo), cada una de las cuales describe de manera sencilla las características y el funcionamiento esperado de las aplicaciones.

Aunque inicialmente se tenía contemplado solamente desarrollar una aplicación móvil, se decidió desarrollar también una aplicación Web para ser consultada por medio de un navegador. Por esto, se desarrolló una aplicación Web usando Javascript, NodeJS, HTML, y el REST API de Firebase.

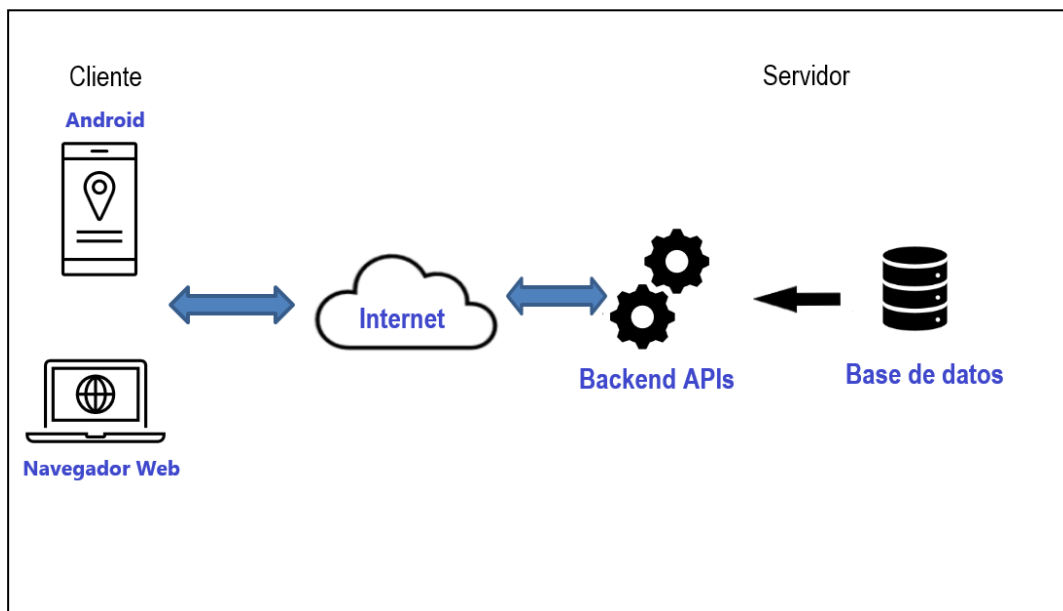
Para desarrollar el software de procesamiento de la información fue necesario implementar una arquitectura cliente-servidor, ya que la información obtenida de los sensores puede ser enviada hacia el servidor de firebase desde NodeMcu. En este caso, solo se requieren dos componentes, el cliente que envía una petición al servidor para se guarde la información de los sensores en la base de datos.

La figura 2-8 presenta los componentes de la arquitectura, en donde el cliente corresponde al software desarrollado e instalado sobre NodeMcu para enviar la información de los sensores, a través de internet, para luego registrar la información en la base de datos, por medio del API de Firebase que se encuentra en el servidor.

Figura 2-8: Arquitectura para software de procesamiento de la información.

Elaboración propia.

El software de aplicación cuenta con una arquitectura cliente-servidor, como se ve en la figura 2-9. A diferencia del software para la persistencia de la información, se le da importancia tanto al envío como a la recepción de la información por parte del cliente, y además el flujo de información de la base de datos será solamente de consulta.

Figura 2-9: Arquitectura software de aplicación

Elaboración propia

Tanto el software para la persistencia de la información, como el software de aplicación usan el patrón “*Aplicaciones 100% desarrolladas con Firebase*”. Esto debido a que son aplicaciones nuevas, que no requieren mucho procesamiento de información. Aunque se definió implementar la arquitectura cliente-servidor, también puede considerarse para este trabajo como una arquitectura en dos capas, en donde una capa es la aplicación cliente, que corresponde la aplicación Web o a la aplicación Android y la otra capa corresponde a la plataforma Firebase del lado del backend.

2.2.4 Obtención de la información

Se desarrolló un componente de software, que a partir de la información enviada por cada sensor, genera una estructura de fácil manipulación en las demás capas. La información de cada nodo en un determinado momento, en formato JSON, se ilustra en la figura 2-10, en donde las claves H,T y HS simbolizan humedad relativa, temperatura y humedad del suelo respectivamente.

Figura 2-10: Información de variables climáticas en formato JSON.

```
{
  "SN": {
    "H1": 0,
    "T1": 0,
    "H2": 0,
    "T2": 0,
    "HS": 0
  }
}
```

Elaboración propia usando la herramienta <https://codebeautify.org/>

Adicional a la información de las variables climáticas, se agrega la información del tiempo (año, mes, día, minuto, segundo) , y el número del nodo, de la siguiente manera:

Nodo > año > mes > día > minuto > segundo > {información de los sensores}

Por ejemplo, el JSON que se observa en la figura 2-11 corresponde a la información obtenida el día 28 de enero para el nodo3, a las 10 55 pm, en el segundo 9.

Figura 2-11: Información de tiempo y variables climáticas en formato JSON.

```
{
  "nodo3": {
    "2021": {
      "1": {
        "28": {
          "22": {
            "55": {
              "9": {
                "h1": -10,
                "h2": 66.400002,
                "hs": 477976,
                "t1": -10,
                "t2": 20.6
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

Elaboración propia usando la herramienta <https://codebeautify.org/>

Siguiendo las buenas prácticas de Firebase para el almacenamiento de la información y dada la necesidad de guardar los valores y la fecha recibida, esa fue la estructura que se consideró más simplificada. Más información se puede encontrar en <https://firebase.google.com/docs/database/web/structure-data?hl=es-419>.

2.3 Validación del Funcionamiento del Sistema

Paralelo al desarrollo e integración de los componentes de sistema, fueron realizadas diferentes pruebas para validar el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema y corregir posibles errores. Las pruebas se ejecutaron usando entre otros recursos la consola del Entorno de Desarrollo de Arduino para verificar el funcionamiento de los sensores y la transmisión de la información, la consola de Firebase para verificar la escritura de la información en la base de datos, Firebug para monitorear las peticiones y respuestas en la aplicación Web, y además, para la aplicación móvil se usó la consola de flutter y el modo *Debug*.

2.3.1 Errores presentados y sus soluciones.

En un principio, un error común fue la conexión de algún cable en el slot incorrecto. Esto se notaba cuando no se veía algún dato por ejemplo. Se redujo la cantidad de incidentes de este tipo cuando se adquirió más práctica y experiencia con los componentes.

Para la lectura de datos de los sensores fue necesario desarrollar un control de tipo software en caso de que los datos de alguno de los sensores no pudieran ser leídos, ya que generaba un dato de tipo NaN (Not a number), lo cual generaba errores al momento de procesarlo. La mayoría de estos errores se presentaron en el desarrollo de los componentes que realizaban la comunicación entre los nodos y la estación base.

Uno de los errores que tomó más tiempo para su solución fue la instalación, en el entorno de desarrollo de Arduino, de dos librerías para la gestión de los nRF24L01, las cuales causaron un par de advertencias (*warnings*) en la compilación y un error en tiempo de ejecución al momento de definir los canales, error relacionado con el tipo de datos.

Para la corrección de este error, primero se hizo una depuración de código, se envió una menor cantidad de información, pero finalmente, se desinstalaron y se volvieron a instalar todas las librerías del Ambiente de desarrollo de Arduino, y fue en ese punto en el que se identificó el par de librerías que tenían nombres similares.

Por último, con el sistema funcionando en el invernadero y cuando cierta cantidad de información fue obtenida, se mostraron las aplicaciones al usuario final para que emitiera su concepto, con el fin de validar el uso, recibir retroalimentación y recomendaciones para trabajos futuros.

En el caso particular del despliegue de la red de sensores se hicieron pruebas de campo. Durante el proceso de instalación de cada uno de los nodos, se verificó que los valores tomados por los sensores eran guardados en la base de datos, revisando constantemente el árbol de datos en la consola de Firebase.

Una prueba integral fue ejecutada cuando los cuatro nodos fueron desplegados. Esta prueba consistió en verificar el que cada uno de los nodos enviaba la información, verificando la consola de Firebase, y la aplicación Web, como se ve en la figura 2-12.

Figura 2-12: Navegación en la consola de Firebase

Elaboración propia.

2.3.2 Verificación del funcionamiento de los nodos.

Las siguientes pruebas se realizaron, usando la consola del Entorno de Desarrollo de Arduino, para cada uno de los nodos.

- Por medio del monitor serial de Arduino (ver figura 2-13), se verificó la lectura de cada uno de los sensores. Se desconectaba el sensor y se verificaba que el sistema pudiera identificar que no era posible realizar la lectura. Luego se conectaba y el sistema debía ser capaz de mostrar la lectura.
- De manera controlada se modificaron las condiciones ambientales, y se esperaba que el cambio se mostrara en el monitor serial. Se pudo notar que el cambio era mostrado en el sistema en menos de un minuto. En algunos casos, el sensor tardaba casi un minuto en estabilizarse.

Figura 2-13: Ejemplo de Log y control de errores

```
datos[0]=NODO;
datos[1]=temperatura;
datos[2]=humedad;

temperatura = dht2.readTemperature();
humedad = dht2.readHumidity();
if (isnan(temperatura)) {
    temperatura = -99;
}
if (isnan(humedad)) {
    humedad = -1;
}
datos[3]=temperatura;
datos[4]=humedad;

datos[5]= analogRead(humedadSuelo);
bool ok = radio.write(&datos, sizeof(datos));

if(ok)
{
    Serial.println("Datos enviados: ");
}
else
{
    Serial.println("no se ha podido enviar");
}
```

Elaboración propia.

2.3.3 Verificación de la transmisión de la información.

Usando el monitor serial del IDE de Arduino, se verificó que cada uno de los nodos estuviera en capacidad de enviar la información. Así que, inicialmente con todos los nodos apagados, se fueron colocando en funcionamiento uno a uno y se verificó que la información de cada nodo se enviaba y llegaba a la estación base

Para verificar que la información podía ser transferida desde un nodo ubicado en el cultivo dentro del invernadero y la estación base que se encontraba fuera de este, se construyó un dispositivo formado por un Arduino y un nRF24L01. Durante las pruebas (Figura 2-14) se detectaron errores de lectura de datos, y lecturas intermitentes; además se evidenció poco alcance por parte del dispositivo. Entonces, se identificaron las causas de los errores y se corrigieron. Además se decidió utilizar nRF24L01 con antena, para conseguir un mayor alcance.

Figura 2-14: Prueba de transmisión de la información, dentro del invernadero.



Elaboración propia.

2.3.4 Verificación del almacenamiento de la información

Para la verificar el almacenamiento de la información se realizaron las siguientes pruebas.

- Se realizaron pruebas de conexión a Firebase y escritura de datos de prueba, como el típico “Hola mundo”, luego se realizaron inserciones de datos más complejos, de tipo texto y numérico. Posterior a esto, se realizaron inserciones con las estructura que se definió, usando datos generados con *hard code*, para verificar, en primer lugar la forma en la que se escribían los datos, y en segundo lugar, para verificar la hora en que eran escritos y estimar el tiempo que tardaba en realizar cada operación.
- La siguiente prueba se realizó, primero con un nodo, luego se fueron agregando los demás nodos. Posterior a esto, se fueron desconectando y conectando varios sensores de manera aleatoria. Para finalizar, se fue apagando cada uno de los nodos. Los resultados fueron exitosos. El comportamiento fue el esperado. La

figura 2-15 muestra una de las pruebas realizadas en Febrero del 2021, fecha en que se realizó el despliegue del sistema en el invernadero.

Figura 2-15: Verificación del funcionamiento de uno de los nodos



Elaboración propia

Una forma de verificar que se estuviera grabando la información en la base de datos, era revisando la consola de Firebase. Cada vez que se hacía un registro, se podía ver de manera inmediata el resultado, como se puede ver en la figura 2-16.

Figura 2-16: Verificación de escritura en Firebase Realtime Database.

Elaboración propia.

2.4 Análisis de la información

A los datos encontrados de temperatura y humedad relativa se les aplicó análisis estadístico univariado, usando el promedio, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Posteriormente fue aplicado el Test de Duncan de comparaciones múltiples para identificar posibles diferencias estadísticas en el comportamiento de la temperatura entre diferentes alturas y entre todos los nodos; esto también se realizó con la humedad relativa. Luego, para identificar alguna posible correlación entre temperatura y humedad relativa se usó el coeficiente de Pearson. Fue necesario seleccionar un periodo de tiempo dentro del cual se tuviera información de todos los nodos; esto se hizo ya que la cantidad de información recolectada por cada nodo, y el tiempo en el que se recolectó variaba por cada nodo.

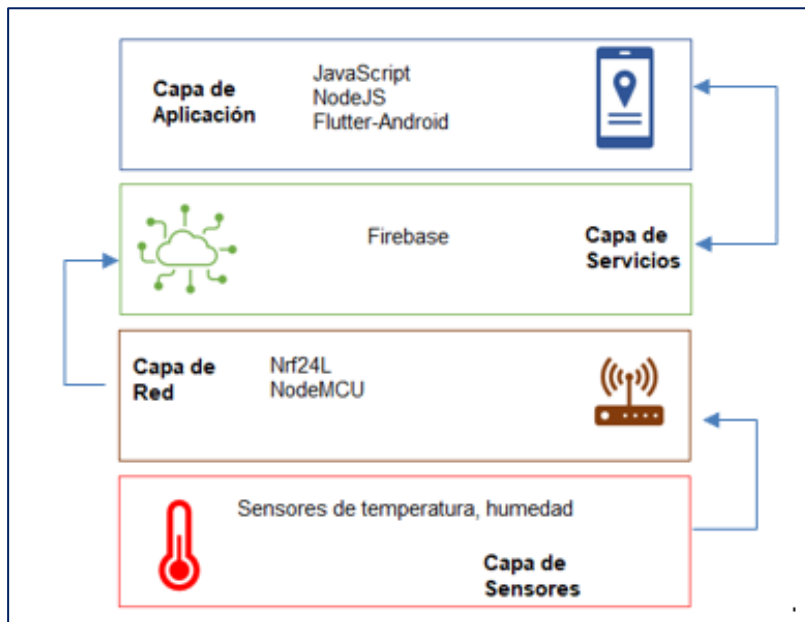
A los datos de humedad del suelo se les calculó el promedio y la desviación estándar. Con base en esos promedios y los rangos reportados en la tabla 2.4. para el sensor FC-28, se definió la “condición del suelo” (“suelo seco”, “suelo ligeramente húmedo” y “suelo húmedo”).

3. Resultados

En este capítulo, se muestran los resultados del estudio, incluyendo el diagrama general del sistema desarrollado para el manejo de datos climáticos con los componentes en cada una de las capas de la arquitectura seleccionada, detalles de la construcción e integración de los componentes donde se hace una descripción de los hallazgos que se consideraron importantes al momento de trabajar con cada uno de estos y la validación del funcionamiento del sistema. Luego se presenta un análisis de la información obtenida, y para finalizar se muestra un presupuesto con los precios en detalle de los componentes electrónicos utilizados para la construcción de la red de sensores.

3.1 Diagrama general del sistema

La construcción del Sistema para el manejo de datos climáticos de pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero usando tecnologías de bajo costo fue guiada por medio de una arquitectura en cuatro capas, según lo explicado en la sección 1.4. En la figura 3-1 se muestra el diagrama general de este ilustrando sus componentes principales en cada una de las capas. Las flechas indican la dirección la comunicación entre las capas. Nótese que para las capas de aplicación y servicios se presenta una comunicación bidireccional. Esto se considera de esta manera porque la capa de aplicación obtiene la información de la capa de servicios por medio de peticiones HTTP.

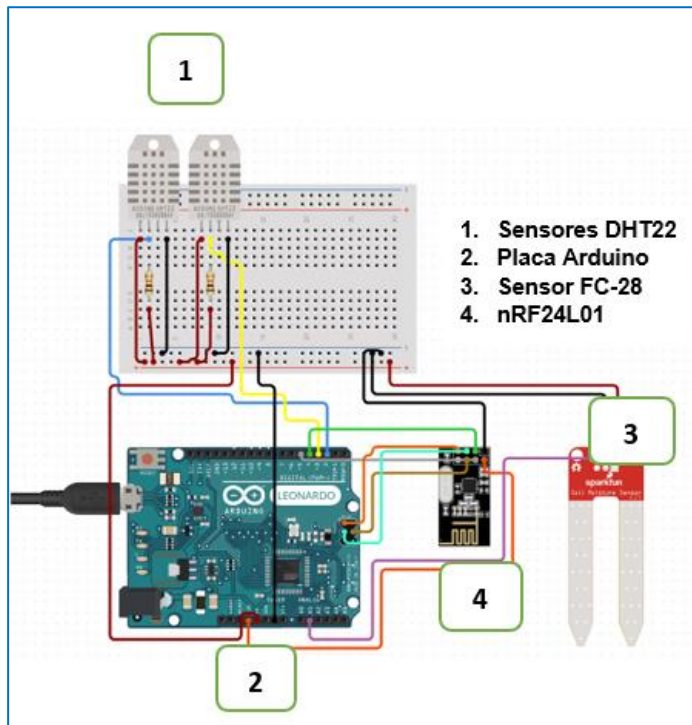
Figura 3-1: Ubicación de los componentes por capa

Elaboración propia

3.2 Resultados de la construcción e integración de los componentes

La unidad fundamental de la capa de sensores es el nodo, el cual se definió en la sección 1.4.1, y básicamente está formado por un sensor, un microcontrolador y un transceptor. Para este proyecto, cada nodo posee dos sensores DHT22 y un sensor FC-28. Por ejemplo, en la figura 3-2 se puede observar el circuito de uno de los nodos, que utiliza esos sensores para medir la humedad del suelo. La comunicación con la capa de Red se realiza por medio del nRF24L01 que se encuentra configurado como emisor. Además, se usó la consola del entorno de desarrollo de Arduino, que soportó la lectura de los sensores sin inconvenientes.

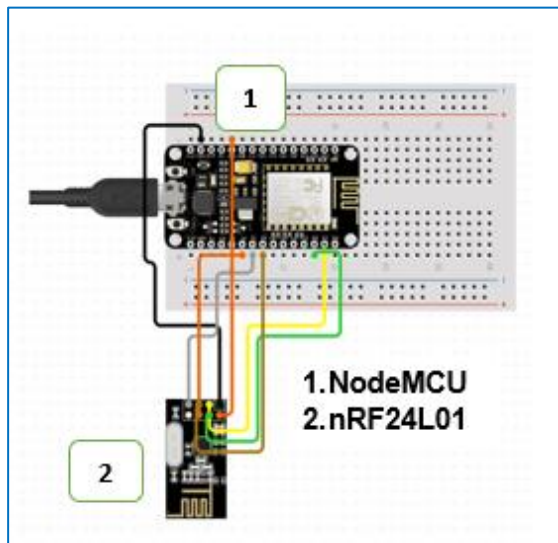
Con el montaje realizado fue posible medir las variables climáticas con la red de sensores seleccionados. Esto se logró con pocos errores en la lectura de datos.

Figura 3-2: Diseño del circuito del nodo.

Elaboración propia usando <https://www.circuito.io/>.

La información enviada por los nodos es recibida por otro nRF24L01 conectado a un NodeMcu (ver figura 3-3); el NodeMcu ha sido considerado como la columna vertebral de la capa de Red, pues está conectado a una red WiFi y tiene la configuración necesaria para conectarse a la base de datos de Firebase. De esta manera es posible guardar la información de las variables climáticas en la Real Time Database, logrando la comunicación de la capa de red con la capa de servicios

El uso del nRF24L01 facilita la transmisión de la información entre los nodos y el Gateway. Como se indicó en la sección 2.1.6, estos dispositivos estaban usando por evento de escritura 24 de los 32 bytes que soportaban. Durante las pruebas no se presentó saturación del canal, ya que continuamente se revisaba la información recibida por medio de consultas a la base de datos usando la consola de Firebase y se pudo evidenciar que la información se registraba de manera continua.

Figura 3-3: Diseño del circuito del Gateway

Elaboración propia usando <https://www.circuito.io/>.

La aplicación móvil, desarrollada con Flutter para la plataforma Android, utiliza servicios REST para consultar los valores obtenidos por los sensores y los cuales se encuentran guardados en Firebase con el propósito de mostrar las alertas, según la configuración. La aplicación web también utiliza los servicios REST, pero en su lugar se utiliza nodeJS, y las consultas se pueden realizar usando Ajax, para mostrar el comportamiento de las variables en un día específico, usando Google graphs. El uso del API REST en las aplicaciones permite la comunicación, de una manera sencilla, entre la capa de aplicación y la capa de servicios. Lo anterior indica que la implementación de diversas tecnologías mostró la interoperabilidad del sistema: la programación de los sensores y el envío de la información hacia Firebase con C++, la consulta de reportes por medio de Javascript, y el monitoreo de microclima del invernadero con Android.

De esta manera, las aplicaciones cumplen con lo esperado: con la aplicación web es posible consultar el comportamiento histórico de las variables climáticas en el invernadero y en el caso de la aplicación móvil, se muestran alertas cuando alguna variable presenta un valor por fuera del intervalo de confianza especificado para el normal desarrollo del cultivo, en este caso referido a temperatura, humedad relativa o humedad del suelo.

3.2.1 Resultados Construcción de la red de sensores

La WSN está desplegada con topología estrella, según las razones expuestas en la sección 2.1.6. La red está formada por cuatro nodos y un Gateway que se encuentra conectado a internet. Con el fin de dar inicio al proceso de validación del sistema, previo al montaje, tal como se mencionó en la metodología, se verificó la precisión de los sensores comparándolos con los valores obtenidos con el equipo WM-4 y utilizando la función coeficiente de correlación en Excel (correlación Pearson). Esta función indica que existe una correlación fuerte si los valores se aproximan a -1 (correlación negativa) o +1 (correlación positiva), y una correlación débil para valores cercanos a 0.

En la tabla 3-1 se muestran las correlaciones encontradas (los datos completos están en el Anexo B “Datos Ambientales en Calibración de los Sensores”). Se evidencia que los valores de la temperatura ambiente en Bogotá (tomados entre el 07 y 09 de diciembre del 2020) tienen una correlación positiva fuerte con un valor mínimo de 0,957 en el caso del sensor 8. Por otro lado, la correlación de la humedad relativa para los sensores 3 y 8 fue débil presentando valores de 0.338 y 0.066 respectivamente.

Los valores bajos de las correlaciones obtenidas con los sensores 3 y 8 pueden estar relacionados con el fabricante del sensor, ya que estos (junto con el sensor 2, que tuvo un comportamiento aceptable) corresponden a una marca diferente a los de los otros cinco sensores disponibles. Otro hecho que se puede notar al momento de tomar medidas es que los sensores requieren entre 1 y 2 minutos para “estabilizarse” y poder obtener una lectura confiable.

Tabla 3-1: Correlación Pearson de medidas de variables climáticas por sensor a temperatura ambiente en Bogotá

Sensor 1	correlación temperatura	0,986261827
	correlación HR	0,638220029
Sensor 2	correlación temperatura	0,998258872
	correlación HR	0,708189036
Sensor 3	correlación temperatura	0,995663429
	correlación HR	0,339826805
Sensor 4	correlación temperatura	0,997020967
	correlación HR	0,994346492
Sensor 5	correlación temperatura	0,999295767
	correlación HR	0,679161015
Sensor 6	correlación temperatura	0,99921999
	correlación HR	0,978312154
Sensor 7	correlación temperatura	0,993413388

	correlación HR	0,931507994
	correlación temperatura	0,956859350
Sensor 8	correlación HR	0,066243434
	correlación temperatura	0,970153218
Sensor 9	correlación HR	0,604506892

Posteriormente se realizó una toma de medidas con temperaturas bajas, en el rango de 10°C hasta 13.6°C, pero la precisión bajó. La prueba de Pearson para todos los sensores, usando nuevamente el equipo WM-4 para la calibración, mostró una correlación negativa de la humedad relativa. Por otro lado, la correlación de la temperatura fue menor a 0.5. Para mayor detalle se pueden consultar los datos de las correlaciones en las tablas del anexo B y tabla 3-2. Dada esta situación, se evaluó la eliminación de los datos de temperatura del sensor número 7, obteniéndose una correlación para esta variable de 0.99, que resulta bastante apropiada. Considerando los resultados con la humedad relativa, para un trabajo posterior, se recomienda realizar más pruebas para esta variable con esos sensores a bajas temperaturas en ambientes controlados, como por ejemplo a nivel de laboratorio, para determinar la precisión con la que estos sensores miden esta variable.

Tabla 3-2: Correlaciones promedio con todos los sensores.

Correlación humedad relativa	-0,34228034
Correlación temperatura	0,44709095

Esto muestra que los valores de las medidas tomadas a temperatura ambiente con los sensores DHT22 fueron muy cercanos a los valores tomados con el WM-4 tanto para temperatura como para humedad relativa. Vale la pena destacar que son sensores de marca genérica, comprados en diferentes tiendas de electrónica. A bajas temperaturas esos sensores presentaron adecuado comportamiento para temperatura, pero errores considerables para humedad relativa. De acuerdo con lo anterior, se considera que ese tipo de sensores son adecuados para la toma de temperatura y humedad relativa a temperatura ambiente, pero a bajas temperaturas los resultados muestran menor confiabilidad en la medición de humedad relativa. Esto significa que si se llegan a presentar bajas temperaturas, como por ejemplo una helada, las medidas de humedad relativa tomadas con estos sensores, pueden llegar a mostrar errores de consideración.

Una vez verificada la precisión de los sensores se procedió a realizar la programación individual de cada una de las placas Arduino, usando el mismo código para todas, salvo una variable de tipo entero (*int*) la cual fue usada para poder identificar cada una de las placas como un determinado nodo. A cada una de las placas Arduino, se le asignó un nRF24L01 configurado como emisor. La estación base fue construida con el módulo NodeMcu, una placa Arduino, y un nodo nRF24L01 configurado como receptor.

3.2.2 Resultados con los Componentes Software

En la sección 2.1.7 se presentaron las tres categorías de software usadas para el desarrollo de este proyecto: el software para Arduino, el software de aplicación y el software para procesamiento de información.

Con el software para Arduino no se presentó ningún problema en tiempo de ejecución con la lectura de los sensores o en el envío y recepción de la información con los nRF24L01. Una situación similar ocurrió con cada una de las aplicaciones que componen la categoría “software de aplicación” (aplicación móvil y Web), ya que la información de la base de datos de Firebase pudo ser consultada sin inconvenientes, usando el formato JSON para el transporte de la aplicación. En cuanto al software para el procesamiento de la información, presentó un manejo satisfactorio de las peticiones realizadas para almacenar la información. Es decir, permitió registrar la información de las variables climáticas en poco tiempo, como era de esperarse.

3.2.3 Almacenamiento de los datos

Se construyó un componente software implementando la librería *firebase-arduino*, la cual provee un API para la comunicación con Firebase. Este componente fue desplegado en NodeMcu, y adicional a esto, se desarrolló otro componente para realizar la conexión a internet por medio de WiFi. La figura 3-4 corresponde a una foto del Gateway ya desplegado en el invernadero, en la cual sobresale el NodeMcu, las baterías y la antena del nRF24L01.

Dado que se requiere la hora exacta en la toma de cada dato de cada nodo, esta se consultó por medio de Network Time Protocol (NTP). Para esto fue necesaria la construcción de un componente de software desplegado en NodeMcu. Así, al momento de

enviar la información hacia Firebase desde NodeMcu, se transmiten los datos de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, y además la fecha y hora en que se toman.

Figura 3-4: Gateway desplegado y en funcionamiento

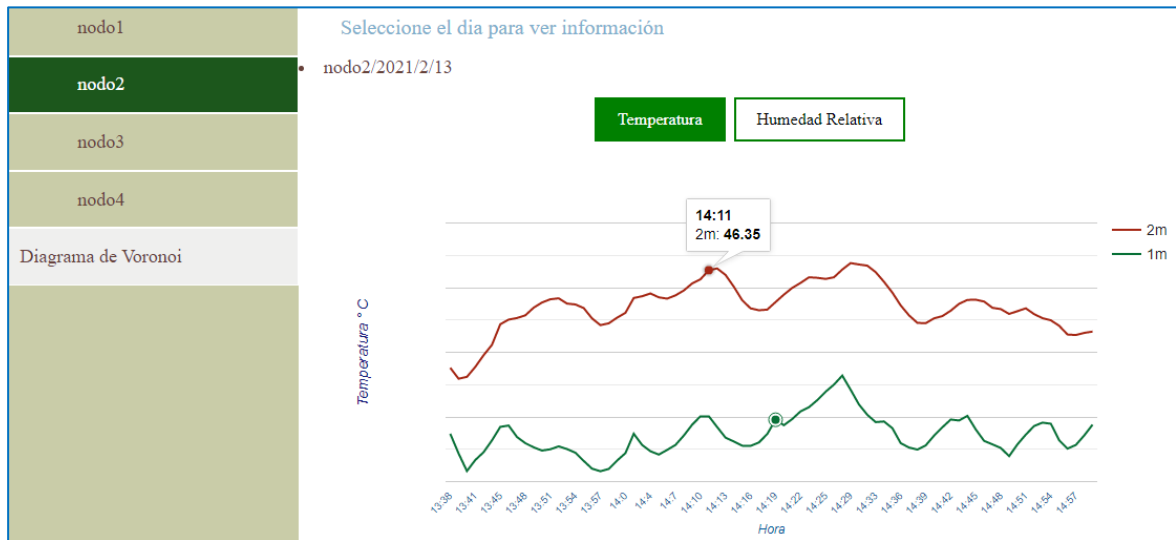


Elaboración propia.

3.2.4 Construcción de la aplicaciones Web y Móvil

La aplicación Web permite consultar la información suministrada por cada nodo y seleccionar una fecha para mostrar el comportamiento de las variables de temperatura, humedad relativa en la fecha seleccionada, como se ilustra en la figura 3-5. Esta aplicación se construyó con Javascript, HTML, y el API de Firebase, y para lograr el despliegue en la nube se requirió un poco de código NodeJS.

Figura 3-5: Aplicación Web



Elaboración propia

Otra funcionalidad de la aplicación es la posibilidad de ver un diagrama de Voronoi usando Google maps, como puede verse en la figura 3-6. Para esto, con los sensores desplegados, a cada nodo se le registra la ubicación, usando un dispositivo GPS, y a partir de esta información se genera dicho diagrama, en donde el espacio geométrico es el área del invernadero y los puntos finitos son cada uno de los cuatro nodos sensor; de esta manera, si se ubica un punto dentro del invernadero, se puede estimar la información climática consultando la información del nodo más cercano.

Figura 3-6: Diagrama de Voronoi generado en la aplicación Web

Elaboración propia.

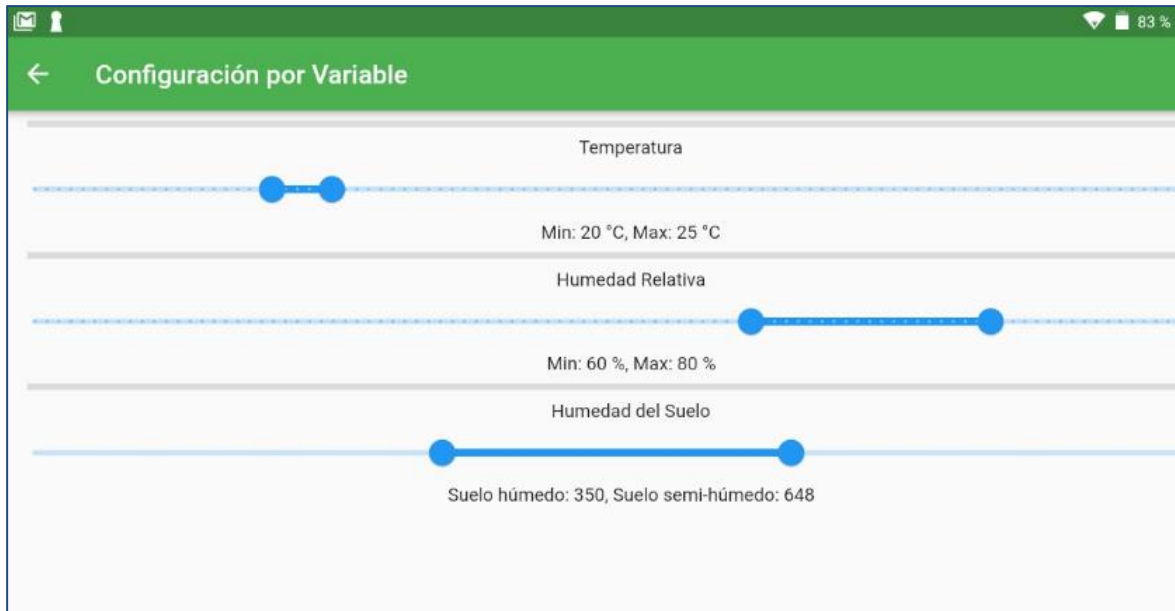
Según la sección 2.1.2 titulada “Selección de las variables climáticas”, se definen los rangos o intervalos de confianza en los que, para este proyecto, se consideran valores óptimos para el desarrollo del cultivo del tomate. Estos son de 20-25°C en el caso de la temperatura; para la humedad relativa el intervalo de 60-80%, y en el caso de la humedad del suelo, dada la capacidad de medición del sensor seleccionado, que se presente algún nivel de humedad en este.

La aplicación móvil desarrollada para la plataforma Android permite definir intervalos de confianza, es decir intervalos de valores para las variables temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. En caso de que alguna variable presente un valor fuera del intervalo definido como “intervalo de confianza”, se presenta una alerta tipo *push* indicando el nodo y la hora en la que se presentó el evento.

La configuración se realiza por medio de dos pantallas de configuración de variables. La primera (ver figura 3-7), permite definir un intervalo de valores por cada variable,

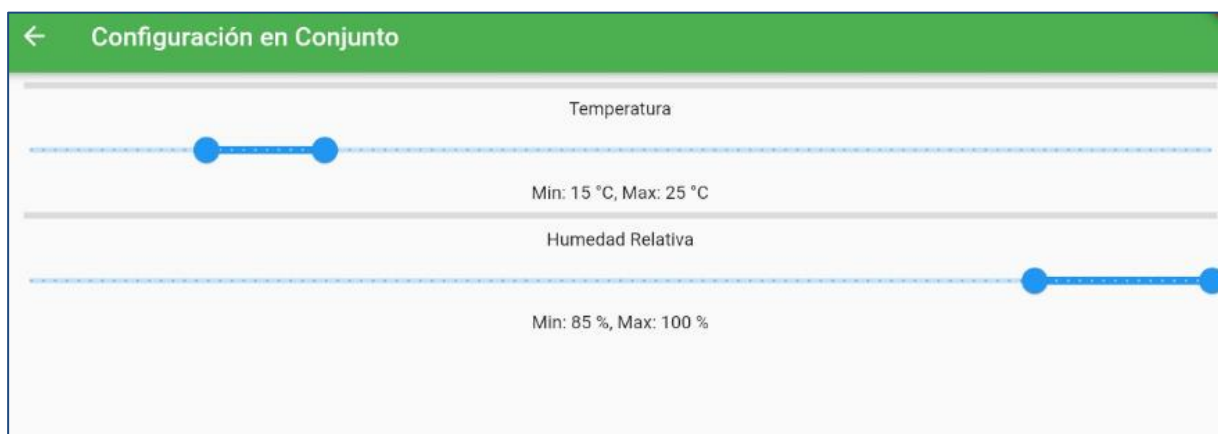
temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, el cual se considera óptimo para el desarrollo del cultivo de tomate. Si una de estas variables se sale del intervalo de confianza, se mostrará una alerta.

Figura 3-7: Pantalla de configuración de intervalos.



Elaboración propia.

La segunda pantalla de configuración (ver figura 3-8) permite definir un intervalo de confianza para la temperatura y otro para la humedad relativa; estos intervalos funcionan en conjunto, por lo que si la temperatura y la humedad relativa presentan valores fuera de los intervalos definidos, se mostrará una alerta tipo *push*.

Figura 3-8: Configuración en conjunto

Elaboración propia.

Para el caso de la configuración individual, las alertas que se muestren tendrán sonido. En el caso de las alertas generadas por la configuración en conjunto, además del sonido, el dispositivo móvil vibrará.

Cuando el usuario hace *click* sobre la notificación se muestra la información detallada de las variables de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, con su respectivo nodo y la hora en la que se registró la toma del dato, como puede verse en la figura 3-9.

Figura 3-9: Notificación con información detallada

Elaboración propia.

Flutter permitió desarrollar la aplicación móvil de manera ágil, usando un equipo con bajos recursos de computación (procesador AMD A10-5745 y memoria RAM de 2 GB). Fue posible desarrollar la aplicación usando la consola de Windows (*cmd*) para la compilación, y adicionalmente se contaba con una herramienta para desplegar la *app* en modo *debug* permitiendo identificar y corregir los errores que se presentaron.

3.3 Validación mediante toma de datos de variables climáticas en el invernadero

Para continuar con la validación del sistema en condiciones de campo, se hicieron pruebas para verificar el funcionamiento de los nodos, la transmisión y almacenamiento de datos, y el funcionamiento de las aplicaciones móvil y web. Por cada nodo se obtuvo información de la temperatura y la humedad relativa a un metro y dos metros del suelo, y de la humedad del suelo; a esta información se le agregaron los datos de fecha y hora al momento de llegar al Gateway, y se almacenaron en la base de datos de Firebase en intervalos entre 5 y 10 segundos.

Con la aplicación móvil y usando los rangos configurados inicialmente (como se definió en la sección 2.1.2), fue posible evidenciar las alertas tipo *push*, si algún valor estaba fuera de los intervalos de confianza. Con la aplicación web fue posible generar reportes, mostrando el comportamiento de las variables temperatura y humedad relativa, durante una fecha seleccionada.

Aunque varias pruebas se realizaron en un invernadero con producción activa, el despliegue de la WSN y las medidas se tomaron con el invernadero próximo a ser remodelado y se tenía una ejecución mínima en los procesos de riego y ventilación. A este último factor se le atribuye haber obtenido temperaturas superiores a 30°C. No se encontró déficit de humedad en el suelo.

3.3.1 Resultados de las mediciones de las variables climáticas temperatura y humedad relativa en el invernadero

A los datos encontrados con los sensores se les aplicó estadística para analizar el comportamiento de esas variables inicialmente en cada nodo (ver tabla 3-3) y luego entre nodos.

Tabla 3-3: Comportamiento de las variables climáticas humedad relativa y temperatura por nodo a diferentes alturas

Nodo 1				
	Media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación
Humedad 2m	29,4	0,772	0,595	2,62
Humedad 1m	26,4	1,442	2,080	5,46
Temperatura 2m	39,2	1,092	1,193	2,78
Temperatura 1m	35,3	0,941	0,886	2,67

Nodo 2				
	Media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación
Humedad 2m	18,7	1,032	1,064	5,52
Humedad 1m	30,0	1,771	3,135	5,90
Temperatura 2m	44,6	1,316	1,733	2,95
Temperatura 1m	34,1	1,417	2,008	4,15

Nodo 3				
	Media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación
Humedad 2m	27,9	0,667	0,44	2,39
Humedad 1m	29,3	1,630	2,66	5,56
Temperatura 2m	37,7	0,686	0,47	1,82
Temperatura 1m	34,5	1,036	1,07	3,00

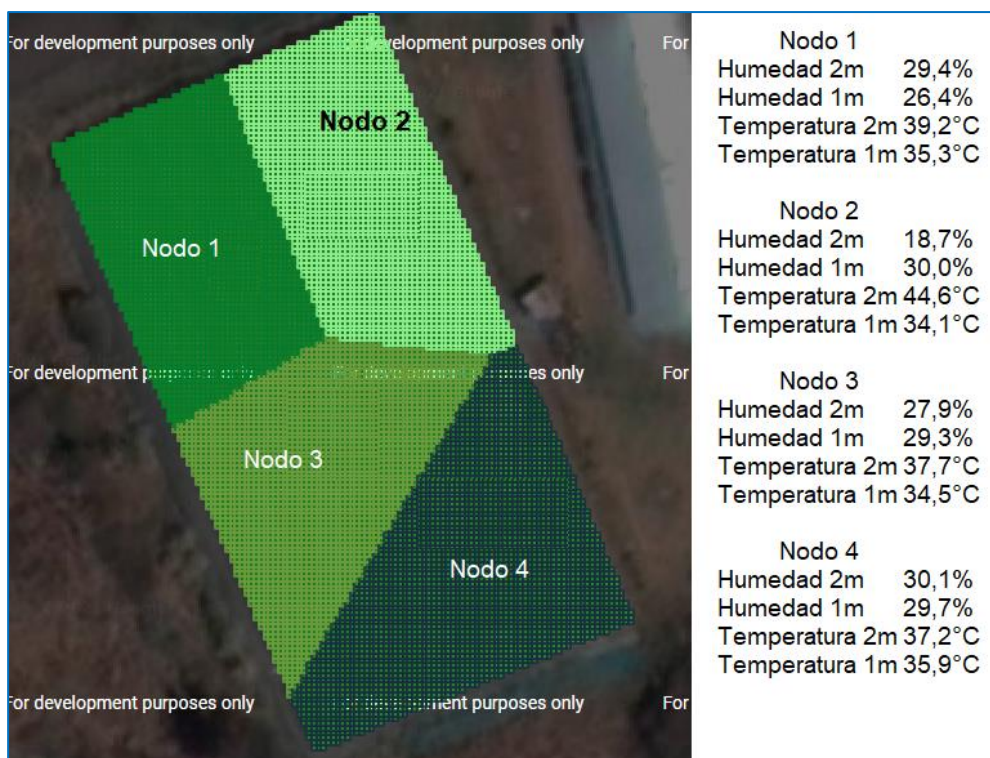
Nodo 4				
	Media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación
Humedad 2m	30,1	3,084	9,514	10,25
Humedad 1m	29,7	2,152	4,631	7,25
Temperatura 2m	37,2	1,666	2,777	4,48
Temperatura 1m	35,9	1,379	1,903	3,85

El promedio más bajo de la humedad relativa fue de 18,7% y el más alto de 30.1%, con coeficientes de variación en el tiempo bajos (inferiores a 6.0%). Por otro lado, la

temperatura presentó un promedio mínimo de 27,9°C y un promedio máximo de 44,6°C, con coeficientes de variación en el tiempo bajos (inferiores a 4.5%), probablemente por la duración de la prueba (2 horas). Estos resultados presentan cierto grado de confiabilidad según lo encontrado en la calibración de los sensores para esos rangos de temperatura (sección 3.2.1).

El promedio de cada una de las variables, usando los polígonos de Voronoi, puede verse en la figura 3-10.

Figura 3-10: Mapa con el promedio de las variables por nodos



Elaboración propia.

Para corroborar la correlación entre la temperatura y la humedad relativa al interior del invernadero, se revisó una carta psicrométrica, y por medio de una herramienta en línea se hicieron cálculos tomando los valores promedio más alto y más bajo de la temperatura, es decir las temperaturas a 2m y a 1m en el nodo 2, respectivamente. Se define la altura del invernadero en Ubaque como 1850 m. Los cálculos pueden verse en las figuras 3-11 y

3-12. Aunque existen varios factores que tienen influencia en el microclima del invernadero, se confirma que existe una correlación inversa entre la temperatura y la humedad relativa.

Figura 3-11: Resultados carta psicrométrica - 2m

Temperatura Bulbu seco, °C: 44,6	Presión, kPa: 81
Altitud, m: 1850	Presión de Saturación, Pa: 9398
<input type="radio"/> Temperatura Bulbo húmedo, °C: 23,3	Presión Parcial Vapor de Agua, kPa: 1,76
<input checked="" type="radio"/> Humedad Relativa, %: 18,7	Humedad específica, g/Kg: 13,8
<input type="radio"/> Temperatura Punto de Rocío, °C: 15,5	Entalpía, kJ/kg: 80,5
Pulsa aquí <input type="button" value="Calcular"/>	Volumen específico, m ³ /kg: 1,15

Elaboración propia usando la herramienta Carta Psicrométrica Online, disponible en la página web <https://ingenieriaelemental.com/>

Figura 3-12: Resultados carta psicrométrica - 1m

Temperatura Bulbu seco, °C: 34,1	Presión, kPa: 81
Altitud, m: 1850	Presión de Saturación, Pa: 5354
<input type="radio"/> Temperatura Bulbo húmedo, °C: 20	Presión Parcial Vapor de Agua, kPa: 1,61
<input checked="" type="radio"/> Humedad Relativa, %: 30	Humedad específica, g/Kg: 12,6
<input type="radio"/> Temperatura Punto de Rocío, °C: 14,1	Entalpía, kJ/kg: 66,6
Pulsa aquí <input type="button" value="Calcular"/>	Volumen específico, m ³ /kg: 1,11

Elaboración propia usando la herramienta Carta Psicrométrica Online, disponible en la página web <https://ingenieriaelemental.com/>

Con el fin de evaluar si hay diferencias estadísticas en los valores de las variables climáticas medidas en los cuatro nodos, se procedió a realizar el *Test de Duncan* de comparaciones múltiples con un nivel de significación de 0.05; para esto, se seleccionó la misma cantidad de datos de cada uno de los nodos, en el mismo lapso, para las variables temperatura y humedad.

Tabla 3-4: Test de Duncan para Humedad relativa

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Humedad(%)	1368	0,81	0,81	6,27	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	17680,22	7	2525,75	837,63	<0,0001
Ubicacion	17680,22	7	2525,75	837,63	<0,0001
Error	4100,88	1360	3,02		
Total	21781,10	1367			
Test:Duncan Alfa=0,05					
Error: 3,0154 gl: 1360					
Ubicacion	Medias	n	E.E.		
N2-2m	18,69	171	0,13	A	
N1-1m	26,40	171	0,13		B
N3-2m	27,86	171	0,13		C
N3-1m	29,34	171	0,13		D
N1-2m	29,40	171	0,13		D
N4-1m	29,67	171	0,13		D E
N2-1m	29,99	171	0,13		E F
N4-2m	30,09	171	0,13		F
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

Como se observa en la tabla 3-4, se presentan diferencias significativas entre ubicaciones para los valores de la humedad relativa, excepto entre las ubicaciones nodo 3 a 1 metro, nodo 1 a 2 metros y nodo 4 a 1 metro dónde los valores son estadísticamente iguales. Por otro lado, se observan diferencias significativas entre las diferentes alturas en un mismo nodo para esta variable.

Se asume que esto se debe a la ubicación de estos dos nodos cerca a la entrada del invernadero. Por ejemplo, el nodo 4 es el más cercano a la puerta del invernadero además y allí las plantas de tomate se veían más frondosas que en otros nodos, como en el caso del nodo 1; y como ya se ha comentado antes, estos factores tienen influencia en el clima al interior del invernadero.

Tabla 3-5: Test de Duncan para la temperatura

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Temperatura (°C)	1368	0,87	0,87	3,29	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13971,95	7	1995,99	1325,84	<0,0001
Ubicacion	13971,95	7	1995,99	1325,84	<0,0001
Error	2047,42	1360	1,51		
Total	16019,37	1367			
Test:Duncan Alfa=0,05					
Error: 1,5055 gl: 1360					
Ubicacion	Medias	n	E.E.		
N2-1m	34,13	171	0,09	A	
N3-1m	34,53	171	0,09	B	
N1-1m	35,26	171	0,09	C	
N4-1m	35,86	171	0,09	D	
N4-2m	37,19	171	0,09	E	
N3-2m	37,71	171	0,09	F	
N1-2m	39,24	171	0,09	G	
N2-2m	44,64	171	0,09	H	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

En el caso de la temperatura, como puede en la tabla 3-5, se presentan diferencias significativas para los valores entre ubicaciones (nodos) y además se encuentra que los valores de la temperatura a 1 metro del suelo son siempre significativamente menores que a 2 metros, lo cual resulta lógico al interior de un invernadero. Esto quiere decir que el microclima en el invernadero presenta diferentes valores según la ubicación y por consiguiente, muestra la importancia de contar con diferentes nodos de muestreo para realizar un monitoreo preciso.

Adicionalmente, en cada uno de los nodos se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para el par de variables Humedad-Temperatura para los valores obtenidos a la misma altura (ver las tablas 3-6 y 3-7 con la información de la Correlación de Pearson). Los resultados muestran correlaciones negativas, con coeficientes de correlación por encima de 0.8. Esto está de acuerdo con la teoría, puesto que la humedad relativa está correlacionada de manera inversa con la temperatura. Dentro de un invernadero la

ventilación, la transpiración del cultivo, entre otros factores y procesos tienen influencia sobre la humedad del aire, es decir sobre la humedad relativa [64].

Tabla 3-6: Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa (1m)

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 1 (1m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,85	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 2 (1m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,91	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 3 (1m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,77	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 4 (1m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,94	1,00

Tabla 3-7: Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa -2m

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 1 (2m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,85	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 2 (2m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,81	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 3 (2m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,68	1,00

Correlación de Pearson - Temperatura y Humedad Relativa Nodo 4 (2m)

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	Humedad	Temperatura
Humedad	1,00	0,00
Temperatura	-0,97	1,00

3.3.2 Resultados de las mediciones de humedad del suelo

Los valores de la tabla 3-8 muestran los promedios de la humedad del suelo por nodo utilizando el sensor FC-28. Para la “condición del suelo” se usaron los rangos reportados en la tabla 2.4. Se puede observar que el promedio de los valores para los nodos 2, 3, y 4, se encuentran dentro del rango “Suelo húmedo”, mientras que para el nodo 1, el valor promedio se encuentra en el rango “Suelo ligeramente húmedo”. Esta condición pudo ser ocasionada debido a que el nodo 1 es el nodo que se encontraba más alejado de la entrada y tenía menos ventilación; además en algunos puntos del invernadero en los nodos 2 y 4, se presentaban pequeños goteos en el sistema de riego, que ocasionaban que aunque estuviera cerrado, el agua seguía esparciéndose.

Tabla 3-8: Estadística de la humedad del suelo

	Media	Condición del suelo	Desv. Estándar	Varianza
Nodo 1	601,646	Ligeramente húmedo	3,718	13,826
Nodo 2	233,431	Húmedo	29,389	863,718
Nodo 3	284,646	Húmedo	8,512	72,451
Nodo 4	390,046	Húmedo	8,612	74,170

3.4 Aceptación del sistema por parte del productor de tomate

El usuario final, esto es el productor, estuvo involucrado durante todo el proceso de la validación del sistema; presenció el despliegue de la red inalámbrica de sensores, la ejecución y validación de todas las pruebas de funcionamiento de los nodos, y la corrección de algunos errores que se presentaron durante el despliegue. Además, a partir del conocimiento del usuario acerca del comportamiento climático del invernadero se facilitó definir la ubicación de los nodos.

Con respecto a la aplicación móvil, el usuario final consideró que la definición de los intervalos de confianza, en la aplicación móvil para las variables de temperatura y humedad, es un proceso sencillo, y además que la información mostrada en las notificaciones era clara y suficiente; también manifestó la posibilidad de usar sistemas similares en otros procesos de la granja que administra. La aplicación Web la considera

útil, ya que permite revisar el comportamiento histórico del clima dentro del invernadero. También considera que ambas aplicaciones son herramientas tecnológicas útiles para el control climático del invernadero.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que las aplicaciones desarrolladas, cumplen la función de servir como herramientas para el monitoreo de las variables climáticas del invernadero mostrando los resultados de las mediciones de una manera sencilla y amigable. La aplicación móvil permite la generación de alertas, y la aplicación Web la generación de reportes, algo que según lo descrito en la sección 1.4.1, es una función que deben tener las aplicaciones usadas en *Smart farming* para la toma de decisiones.

3.5 Presupuesto

En total se emplearon 8 sensores DHT22 y 4 FC-28. El precio de los componentes electrónicos, y otros elementos que fueron necesarios para la construcción de cada uno de los nodos y del Gateway se resume a continuación. Los precios son aproximados ya que algunos elementos se compraron con descuento, como el caso de las baterías, las cuales se consiguieron a diferentes precios en varios lotes. No obstante, en conjunto, el presupuesto que se muestra en la tabla 3-9 está bastante ajustado a los actuales precios comerciales en Bogotá.

Tabla 3-9: Presupuesto del sistema en peso colombianos a Febrero del 2021

Elemento	Precio	Cantidad	Total
DHT22	17.000	8	136.000
FC28	5000	4	20.000
Arduino UNO	27.000	5	135.000
NodeMcu	18.000	1	18.000
nRF24L01	15.000	5	75.000
Cables varios x 10	2.000 x 10 cables	8	16.000
Pilas Recargables	4.600 x unidad	30	138.000

Cable Ribbon de 10 hilos	4.600 x metro	4	18.400
Porta Pilas	6.000	6	36.000
MDF	2.000 lamina	3	6.000
Tubo PVC	4.500 x metro	10	45.000
Codo PVC	1.500	8	12.000
Total			\$ 655.400

Un nodo, como se observa en la figura 3-13, está compuesto por una placa Arduino, 5 baterías, y un transceptor, además de los cables y la estructura de MDF sobre la que se construye tiene un costo aproximado de COP 70.000.

Figura 3-13: Nodo desplegado y en funcionamiento



Elaboración propia.

La mayor inversión se presenta en la cantidad de placas Arduino. Dado que las baterías son de vital importancia, se eligieron del tipo recargables y se espera que se puedan usar

por varios ciclos de carga, ya que no es una marca reconocida y no se cuenta con información previa de su comportamiento.

Cada sensor DTH22 tiene un costo de casi 3 veces el valor de un DHT11; la diferencia además de la precisión está en el intervalo de los valores que soporta para la humedad relativa, ya que mientras el sensor DHT22 puede medir humedades de 0 a 100%, el DHT11 mide humedades de 20 hasta el 80%; este último sensor se puede considerar para otras aplicaciones en las que las variables se encuentren dentro de los rangos mencionados y que incluso requieren una menor precisión.

En cuanto a las placas de Arduino, no es necesario tener una placa por sensor; se recomienda usar al menos 3 sensores por placa. De esta manera se podrá reducir el costo, y tener una mayor cobertura. Vale la pena recordar que en el despliegue realizado, cada placa Arduino tenía 3 sensores a diferente altura pero en una misma ubicación.

Al momento de planear un despliegue de una red de sensores, se recomienda evaluar el costo del cableado versus el costo de un nodo. Por ejemplo, si se desea construir un nodo con dos sensores DHT22, debe considerarse que este sensor requiere tres cables para su funcionamiento, y que un metro de cable Ribbon con 10 hilos (es decir 10 metros de cable) cuesta en promedio COP 4.500; El primer sensor se instala cerca a la placa Arduino, por lo que el cableado se puede hacer con una mínima cantidad de cable (que no supere los 60 cm). Para el segundo nodo, si se usa el metro de cable Ribbon, puede ser desplegado a una distancia aproximada de 3 metros desde la placa Arduino. Obviamente, para mayores distancias la cantidad de cable aumentará, al igual que su precio, y puede llegar un punto en el que sea más económico instalar otro nodo que desplegar el cable; otro aspecto a tener en cuenta al momento de usar cables es la movilidad y mantenimiento del sensor. En algunos foros en internet se comenta del uso de cable UTP para proyectos Arduino. Este tiene un costo aproximado de COP 2.500 el metro, y tiene 8 hilos. Es una opción para considerar, siempre y cuando el cable sea de cobre en su totalidad.

De acuerdo con el presupuesto presentado y las consideraciones realizadas, se tiene que con las opciones disponibles en el mercado, fue posible construir un sistema para monitorear variables climáticas en el invernadero, con cuatro nodos, y una conexión a internet, con la inversión equivalente a la fecha, a menos de un salario mínimo mensual

en Colombia. Las baterías o fuente de alimentación del sistema, como se indicó previamente, siguen siendo un ítem para tener muy en cuenta en la construcción de WSN, debido a su costo y vida útil. Como ya se mencionó, el costo del sistema es proporcional a la cantidad de sensores desplegados, la tecnología utilizada para soportar la lectura y transmisión de información, y en menor medida, al software empleado para la gestión y consulta de la información.

La inversión resulta baja si se considera que puede tener una vida útil entre 3-5 años que corresponde a lo esperado para la plataforma Arduino (20.7% de la inversión total), incluso en algunos foros de esta se habla de una vida útil de hasta 8 años. Sin embargo, será necesario cambiar los sensores DHT22 (20.9% de la inversión total) cada 1 - 2 años. Para los otros componentes se espera una útil de 4-5 años. Todo lo anterior también depende del tiempo de uso, las condiciones ambientales y los cuidados con estos equipos.

La inversión en el sistema (COP 655,400) se puede recuperar en el corto plazo, considerando que brinda importantes beneficios en términos de información en tiempo real de variables climáticas, con lo cual el productor puede tomar decisiones para mejorar el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo, y por consiguiente su rentabilidad.

De todas maneras, es importante que antes de implementar el sistema se realice un análisis beneficio-costos y se tengan en cuenta los aspectos de capacitación del responsable del invernadero y de los operarios para su adecuada utilización.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este proyecto tuvo como objetivo general construir un prototipo de sistema que permita el manejo de datos climáticos en pequeñas producciones agrícolas bajo invernadero. Como conclusiones se tiene:

- i. Se construyó el prototipo de sistema para el manejo de datos climáticos, como un acercamiento a la agricultura inteligente, con una red de sensores inalámbricos, usando Arduino, módulos nRF24L01, sensores de bajo costo, NodeMcu e integrando la información obtenida con firebase database.
- ii. La revisión de la literatura asociada con el impacto climático en los cultivos bajo invernadero y la arquitectura seleccionada facilitaron el diseño del sistema y la identificación de los componentes necesarios para su construcción.
- iii. El sistema construido es de bajo costo, con un presupuesto aproximado de 655.000 COP a precios corrientes de febrero del 2021. Es una inversión baja si se considera una vida útil de 3 a 5 años y los importantes beneficios que brinda el sistema para mejorar el desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo.
- iv. La metodología seguida para el diseño del sistema de manejo de datos climáticos para cultivos bajo invernadero incluyó de los siguientes pasos de manera sistemática: selección de la especie, identificación de las variables climáticas con mayor impacto sobre el cultivo, elección de los sensores necesarios y la(s) plataforma(s) base para soportar la programación y lectura de la información, y validación en campo del prototipo diseñado y construido.
- v. Respecto a la construcción e integración de los componentes, fue necesario aplicar conocimientos básicos en circuitos para el montaje de cada uno de los nodos y la comunicación con el gateway.
- vi. La arquitectura seleccionada para la construcción del software de aplicación y el software para la gestión de la información, además de permitir identificar de manera sencilla los componentes necesarios por categoría de software, facilitaron la integración entre estos, en especial lo que se refiere a la comunicación con Firebase, ya sea para almacenamiento o consulta de la información.

- vii. Arduino, NodeMCU y Firebase son opciones válidas para considerar en el desarrollo de sistemas similares de granjas inteligentes, por ser económicas, fáciles de usar, permiten la integración con muchas plataformas y cuentan con una gran cantidad de documentación.
- viii. Con los API web y REST de Firebase se logró construir una aplicación de manera fácil, sin problemas de integración y compatibilidad entre las APIs. Javascript junto con NodeJS se utilizó para construir la aplicación WEB que implementó las APIs.
- ix. Flutter demostró ser un SDK con el que es posible construir una aplicación móvil de manera ágil, y con una baja cantidad de recursos de computación, además de tener amplia documentación y una extensa cantidad de componentes y librerías.
- x. La inversión en el desarrollo de circuitos impresos puede facilitar el despliegue de la red de sensores. Se presenta como un aspecto a tener en cuenta al momento de realizar proyectos similares o fortalecer la investigación realizada.
- xi. La validación del sistema se inició con pruebas a cada uno de los sensores y demás dispositivos, mientras se realizó la programación, lo cual permitió detectar y corregir errores y además favoreció el despliegue del sistema en el invernadero, ya que durante este proceso no se presentó incidente alguno, sin requerir programación adicional en ninguno de los dispositivos.
- xii. Con la validación del sistema en el invernadero seleccionado se cumplió con la expectativa del funcionamiento, se recopiló información climática en distintos puntos del invernadero seleccionado (nodos), sin evidenciar errores. Las pruebas realizadas mostraron diferencias significativas entre nodos y alturas con respecto al suelo, mostrando que aun en pequeños invernaderos tiene potencial la agricultura de precisión.
- xiii. Para proyectos similares, si se planea construir el sistema por completo, es decir construyendo cada una de las capas, es necesario tener conocimiento básico de circuitos para entender los diagramas de los diferentes componentes, evitar daños causados por cortocircuitos y detectar errores en el funcionamiento.
- xiv. Los comentarios recibidos por el encargado del invernadero frente al sistema desarrollado fueron favorables y dejan abierta la posibilidad de desarrollar sistemas similares para implementarlo en otros procesos de la granja.

- xv. En mi calidad de estudiante, el trabajo realizado me permitió conocer aspectos de la agricultura colombiana, de las cadenas productivas, y en particular de cultivos bajo invernadero. Este acercamiento muestra grandes oportunidades para desarrollar aplicaciones basadas en tecnologías digitales dentro del concepto de granjas inteligentes en el país, con lo cual se puede facilitar la labor del agricultor en su día a día.

4.2 Recomendaciones

Para una mayor economía se recomienda el uso de una topología en estrella, usando transceptores sin antena en cada uno de los nodos. De esta manera se reduce el costo de los transceptores en un 250% o 300%.

Aunque en el mercado se consiguen sensores con un relativo bajo costo, si se quiere una mejor precisión en las mediciones, se recomienda una inversión mayor. Existen diferentes marcas y fabricantes, pero en términos generales, los datos obtenidos con los sensores DHT22 fueron similares a los que se obtienen con elementos de medición como el WM-4.

Se recomienda aprovechar los diferentes slots de Arduino para la instalación de diferentes componentes como los sensores. Aunque esto aumenta el consumo de energía, se consigue un notable ahorro en el presupuesto.

El consumo de energía y las baterías por usar (preferiblemente recargables) son temas para considerar tanto a nivel presupuestal como técnico. Son diferentes los factores que pueden influir con que una batería se descargue; desde la marca, el tiempo de carga, la vida útil y su amperaje y la cantidad de dispositivos que requieren de su corriente. Se recomienda tener en cuenta estos aspectos desde las fases iniciales del diseño del sistema de granja inteligente.

En el prototipo de sistema diseñado y construido, para la capa de sensores se recomienda Arduino y para la capa de red, NodeMcu. En la capa de servicios, Firebase en su versión

gratuita ofrece una base de datos en tiempo real con hasta 1GB de almacenamiento. La capa de aplicación es una decisión según la experiencia del desarrollador, pero se recomiendan desarrollos con API REST, uso de frameworks y tener una buena integración con la capa de servicios. Para desarrollos en donde se involucre WiFi se recomienda el uso de NodeMcu, tanto por el precio como por la facilidad de conexión con internet y por el soporte del protocolo https.

Aunque existen diferentes tecnologías, frameworks, APIs y servicios, se recomienda también realizar un estudio de las ventajas, las limitaciones, la configuración necesaria y el coste que tienen cada una de estas tecnologías, sin olvidar realizar algunas pruebas o desarrollos *dummies* para verificar que se puede realizar lo que se requiere. Adicionalmente se debe poder ofrecer sistemas con notificaciones. Existen diferentes plataformas que con un bajo costo soportan cada uno de los niveles de la arquitectura seleccionada.

Antes de implementar un sistema como el aquí desarrollado es necesario realizar un análisis beneficio-coste y prever labores de capacitación para su adecuada utilización.

Se recomienda que el sistema diseñado y construido sea evaluado en otros cultivos bajo invernadero, en diferentes condiciones climáticas y probar otros equipos de bajo costo (en particular los sensores), contando con la participación del productor.

A. Anexo: Historias de Usuario

Historia de Usuario Número 1	
Título	Consultar información Histórica
Aplica	Web
Descripción: Como usuario responsable del invernadero, accedo a la aplicación web, en la cual se presentará una lista de nodos, cada uno de los cuales puede ser seleccionado haciendo click, y posterior a esto, se mostrará una lista de fechas con información disponible de temperatura y humedad relativa. Al seleccionar cada una de las fechas, se mostrará por medio de una gráfica, el comportamiento durante el día de la temperatura o la humedad relativa. La variable que se mostrará se debe seleccionar por medio de una pestaña.	
Resultado:	Usuario consulta el histórico de la información climática del invernadero.
Flujo Alternativo:	No se existen datos disponibles, según los diferentes filtros.

Historia de Usuario Número 2	
Título	Ver diagrama de Voronoi
Aplica	Web
Descripción: Como usuario responsable del invernadero, accedo a la aplicación web, y selecciono la opción para visualizar el diagrama de Voronoi del invernadero, en el cual se podrán identificar los nodos, y sus correspondientes zonas. El diagrama debe mostrarse usando como fondo una vista satelital con la ubicación del invernadero, con la posibilidad de hacer zoom-in y zoom-out.	
Resultado:	Usuario consulta diagrama de voronoi.
Flujo Alternativo:	Se presenta algún error

Historia de Usuario Número 3	
Título	Iniciar Monitoreo / Detener Monitoreo
Aplica	Móvil
Descripción:	El usuario accederá a la aplicación móvil y podrá iniciar o detener el proceso de monitorear las variables. .
Resultado:	Se inicia o se detiene la consulta en la base de datos.
Flujo Alternativo:	

Historia de Usuario Número 4.1	
Título	Definir intervalos óptimos para las variables
Aplica	Móvil
Descripción:	El usuario accede a la aplicación móvil y podrá definir un intervalo para cada variable (temperatura y humedad relativa), el cual se considere óptimo para el desarrollo del cultivo. Estos intervalos tendrán los valores iniciales de 20-25°C para temperatura y de 60-80% para humedad relativa. Para la humedad del suelo, se inicia con un rango entre 300 y 700.
Resultado:	El usuario define nuevos intervalos para las variables.
Flujo Alternativo:	No se cambia ningún intervalo. Se realiza solamente la consulta de los intervalos.

Historia de Usuario Número 4.2	
Título	Definir intervalos óptimos para las variables en conjunto
Aplica	Móvil
Descripción: El usuario accede a la aplicación móvil y podrá definir un intervalo de confianza para monitorear el comportamiento en conjunto de las variables temperatura y humedad relativa.	
Resultado:	El usuario define nuevos intervalos para las variables.
Flujo Alternativo:	No se cambia ningún intervalo. Se realiza solamente la consulta de los intervalos.

Historia de Usuario Número 5	
Título	Alertas del sistema
Aplica	Móvil
Descripción: La aplicación móvil presentará, al usuario responsable del invernadero, notificaciones de tipo <i>push</i> , indicando si algún valor de la temperatura, la humedad relativa o la humedad del suelo se encuentra fuera del rango definido como permitido. La notificación tendrá la información correspondiente al nodo, la fecha y hora, la variable y el valor.	
Resultado:	El usuario es informado de valores de temperatura, humedad del suelo y humedad relativa registrados fuera de los intervalos establecidos como óptimos.
Flujo Alternativo:	No se presenta ningún valor fuera del rango establecido, por lo que no se muestra ningún mensaje.

B. Anexo: Datos Ambientales en la Calibración de los Sensores

Datos ambiente 1 (exterior de la vivienda)				
	temp. sensor	hum. sensor	temp. WM-4	hum. WM-4
sensor 1	20,9	63,7	22	61
sensor 2	20,5	76,1	21,2	65,1
sensor 3	21,6	63,5	21,1	64,1
sensor 4	21	64,3	20,8	68,2
sensor 5	20,9	64,1	21,3	66,5
sensor 6	20,3	66,7	21,1	66,4
sensor 7	22,4	57,8	23,1	58,2
sensor 8	20,5	76,3	20,7	66,4
sensor 9	20,5	65,3	20,5	69,1
Datos ambiente 2 (dentro de la vivienda)				
	temp. sensor	hum. sensor	temp. WM-4	hum. WM-4
sensor 1	16,4	76,6	16,3	79
sensor 2	15,6	90,9	15,9	79,6
sensor 3	15,4	91,8	15,5	79,2
sensor 4	15,4	81,6	15,3	79,5
sensor 5	16,3	76,4	16,1	76,4
sensor 6	15,6	80,6	15,5	80
sensor 7	15,9	79,2	15,7	78
sensor 8	16,6	89,8	16,2	76,4
sensor 9	15,8	78,4	15,7	78
Datos ambiente 3 (zona húmeda de la vivienda)				
	temp. sensor	hum. sensor	temp. WM-4	hum. WM-4
sensor 1	23,3	68,2	22,3	70,7
sensor 2	21,7	86,3	21,8	73,3
sensor 3	21,4	81,7	21,9	76
sensor 4	22,1	72,6	22,9	73,5
sensor 5	22,4	70,7	22,8	70,4
sensor 6	22,1	72,9	23	71,8
sensor 7	21,7	74,6	23,4	69,6
sensor 8	21,5	90,7	23,7	70,6
sensor 9	21,6	74,1	24,2	65,6

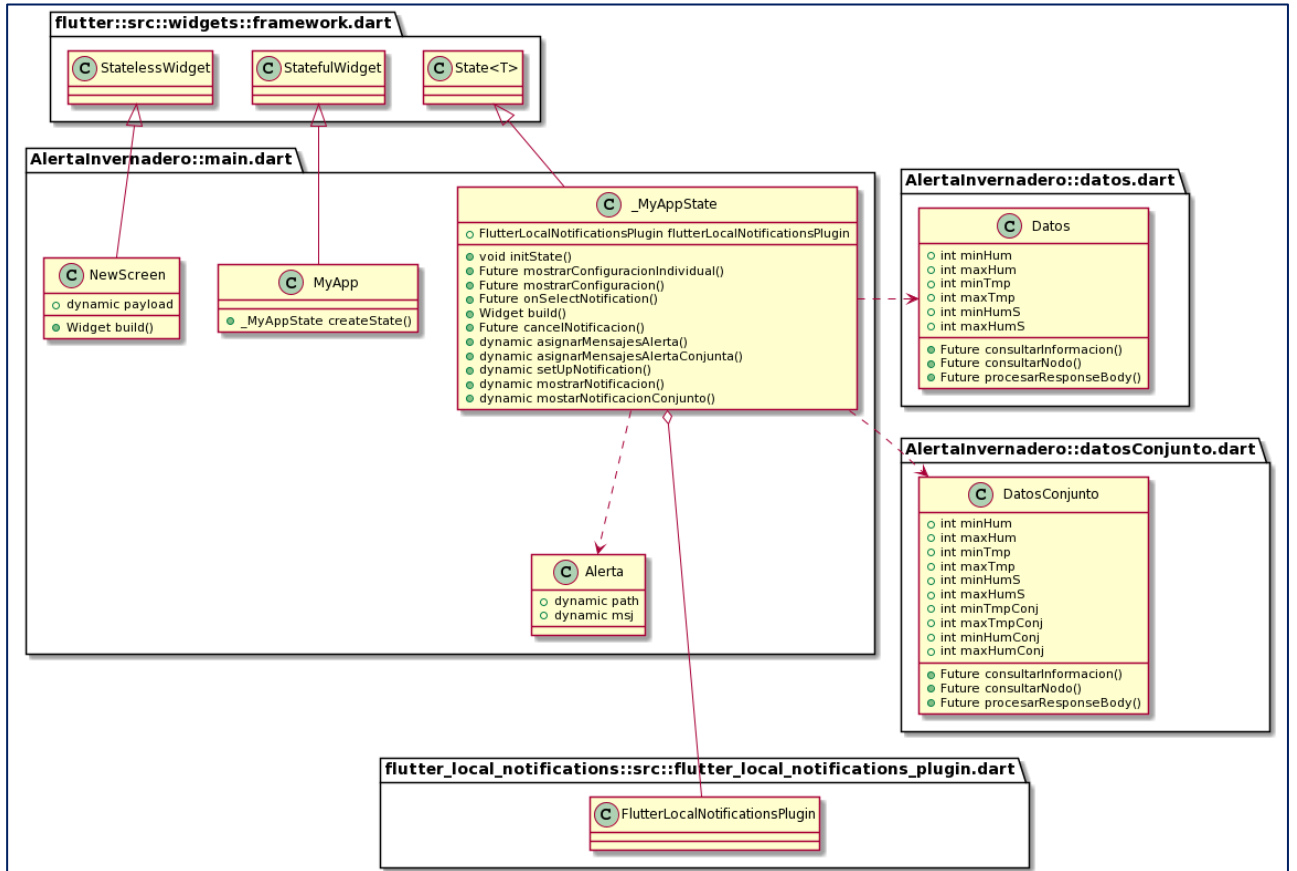
Datos ambiente 4 (nevera de icopor)				
	temp. sensor	hum. sensor	temp. WM-4	hum. WM-4
sensor 1	11,5	76,9	11,3	66,5
sensor 2	12,4	67,2	12,5	70,6
sensor 3	12,3	59,6	12,7	80,6
sensor 4	12,3	72	12,1	72,2
sensor 5	13,6	79,3	13,6	70,4
sensor 6	12,7	66,2	12,7	68,5
sensor 7	10	70,2	10,7	73,2
sensor 8	11,3	74,2	13,5	77,5
sensor 9	11,6	62,9	12,8	67,2

Datos a bajas temperaturas (rango de 12.4 a 13.1°C)

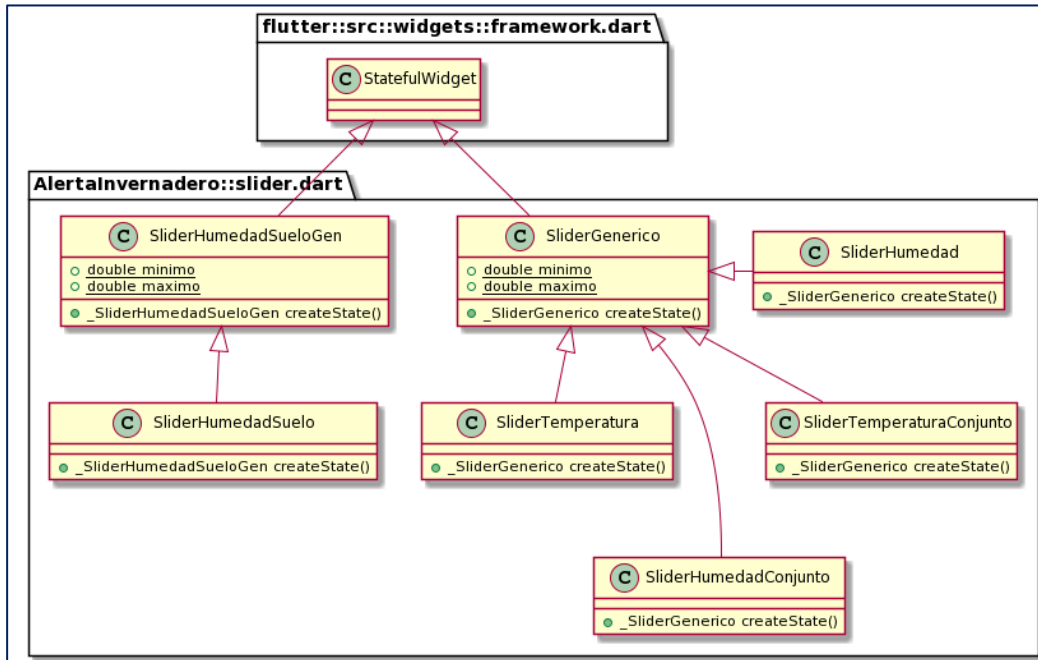
	temp. sensor	hum. sensor	temp. WM-4	hum. WM-4
sensor 1	12,4	64,5	12,2	87,7
sensor 2				
sensor 3				
sensor 4	12,5	74	12	73,1
sensor 5	12,5	81,8	12,1	85,8
sensor 6	12,7	67,3	11,5	87,9
sensor 7	13	69,6	12,1	85,7
sensor 8				
sensor 9	13,1	73,5	12,8	81,1

C. Anexo: Diagrama de clases de la aplicación móvil

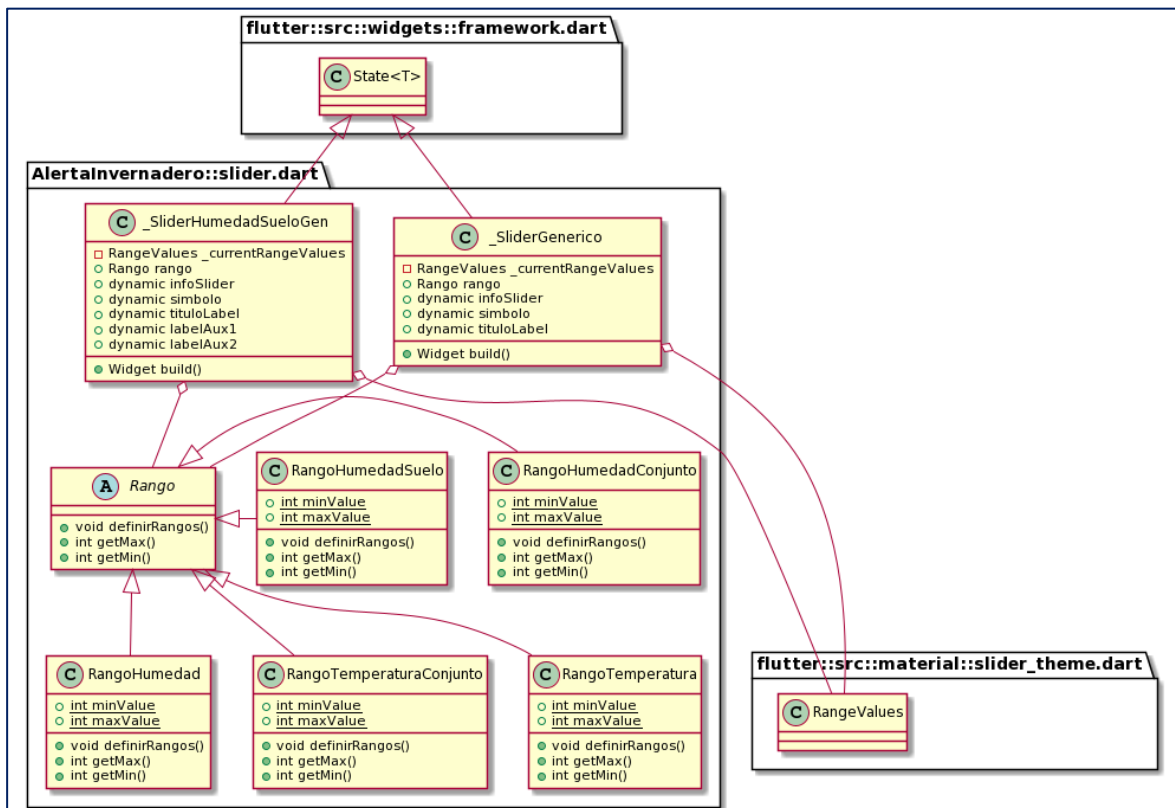
Clases para el arranque de la aplicación, para la gestión de las notificaciones y la consulta de los datos en Firebase



Clases para la configuración de la interfaz gráfica I.



Clases para la configuración de la interfaz gráfica II.



Bibliografía

- [1] Food and Agriculture Organization, "Feeding the world in 2050 - An Australian's perspective," *Food Australia*, 2010. [Online]. Available: fao.org/tempref/docrep/fao/meeting/018/k6021e.pdf. [Accessed: 12-Dec-2020].
- [2] C. M. Chidambaranathan, S. S. Handa, M. V. Ramanamurthy, and M. V. Ramanamurthy, "Development of smart farming - a detailed study," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 2.4, p. 56, Mar. 2018.
- [3] M. J. O'Grady and G. M. P. O'Hare, "Modelling the smart farm," *Inf. Process. Agric.*, vol. 4, no. 3, pp. 179–187, Sep. 2017.
- [4] E. Andrés Villagrán, R. Gil, J. Fabio Acuña, and C. R. Bojacá, "Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse Optimización de la ventilación y su efecto en el microclima de un invernadero multitúnel colombiano," 2012.
- [5] "¿Por qué cultivar en invernadero? Ventajas y desventajas | Berger - ES." [Online]. Available: <https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/cultivar-invernadero-ventajas-desventajas/>. [Accessed: 07-Apr-2021].
- [6] Cámara de Comercio de Bogotá, *Manual: Tomate*. 2015.
- [7] J. Doshi, T. Patel, and S. kumar Bharti, "Smart Farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions."
- [8] KCVS, "Explaining Climate Change." [Online]. Available: http://www.explainingclimatechange.ca/lesson1/1_1_1.html. [Accessed: 15-Dec-2019].
- [9] GCOS, "Essential Climate Variables | GCOS." [Online]. Available: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>. [Accessed: 15-Dec-2019].
- [10] IDEAM, "GLOSARIO METEOROLOGICO INSTITUTO DE HIDROLOGIA METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM," 2019.
- [11] OSMAN, "Temperatura ambiental: Diccionario : Divulgacion : OSMAN." [Online]. Available:

<https://www.osman.es/diccionario/definicion.php?id=14127>. [Accessed: 03-Jun-2020].

- [12] G. C. Nelson *et al.*, “Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación,” 2009.
- [13] F. M. Chmielewski, A. Müller, and E. Bruns, “Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 121, no. 1–2, pp. 69–78, Jan. 2004.
- [14] S. Salazar-García, Isidro;, J. Luis González-Durán, ; Luis, and M. Tapia-Vargas, “INFLUENCIA DEL CLIMA, HUMEDAD DEL SUELO Y ÉPOCA DE FLORACIÓN SOBRE LA BIOMASA Y COMPOSICIÓN NUTRIMENTAL DE FRUTOS DE AGUACATE ‘HASS’ EN MICHOACÁN, MÉXICO,” 2011.
- [15] T. B. Pathak and C. S. Stoddard, “Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 765–775, Jun. 2018.
- [16] C. Lau, J. Ramírez, and A. Jarvis, “Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático,” *CGIAR*, 2013. [Online]. Available: https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/57475/politica_sintesis1_colombia_cambio_climatico_2.pdf. [Accessed: 02-Jul-2020].
- [17] F. A. Vallejo Cabrera, “Agronomía del tomate,” in *Mejoramiento genético y producción de tomate en Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, 1999.
- [18] E. Borgia, “The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues,” *Comput. Commun.*, vol. 54, pp. 1–31, Dec. 2014.
- [19] S. Elhadi, A. Marzak, N. Sael, and S. Merzouk, “Comparative Study of IoT Protocols,” *SSRN Electron. J.*, Jun. 2018.
- [20] M. S. D. Abhiram, J. Kuppili, and N. A. Manga, “Smart Farming System using IoT for Efficient Crop Growth,” in *2020 IEEE International Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, SCEECS 2020*, 2020.
- [21] S. Puengsungwan and K. Jirasercamomkul, “IoT Based Stress Detection for Organic Lettuce Farms Using Chlorophyll Fluorescence (ChF),” in *6th*

- Global Wireless Summit, GWS 2018*, 2018, pp. 354–357.
- [22] C. Bell, *Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi*, vol. 9781430258. Apress Media LLC, 2013.
- [23] S. Yinbiao, K. Lee, Jianbin Fan, and Hao Hu, “Internet of Things: Wireless Sensor Networks.”
- [24] R. R. Selmic, V. V. Phoha, and A. Serwadda, *Wireless Sensor Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [25] S. Yinbiao, L. Kang, and L. Peter, “IEC White Paper: Internet of Things: Wireless Sensor Networks.” [Online]. Available: <https://basecamp.iec.ch/download/iec-white-papers-internet-of-things-wireless-sensor-networks/>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [26] S. M. Abd El-Kader and B. M. Mohammad El-Basioni, “Precision farming solution in Egypt using the wireless sensor network technology,” *Egypt. Informatics J.*, vol. 14, no. 3, pp. 221–233, Nov. 2013.
- [27] B. Kalantari, “The State of the Art of Voronoi Diagram Research,” in *Trans. on Comput. Sci. XX*, vol. 8110, Springer-Verlag, 2013, pp. 1–4.
- [28] F. R. Leiva Barón, *Agricultura de precisión en cultivos transitorios*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, 2009.
- [29] R. N. Athirah, C. Y. N. Norasma, and M. R. Ismail, “Development of an Android Application for Smart Farming in Crop Management,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 540, no. 1.
- [30] M. Mamani, M. Villalobos, and R. Herrera, “Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola,” *Ingeniare*, vol. 25, no. 4, pp. 599–618, Dec. 2017.
- [31] S. N. Nnadi and F. E. Idachaba, “Design and Implementation of a Sustainable IOT Enabled Greenhouse Prototype,” in *IEEE 5G World Forum, 5GWF 2018 - Conference Proceedings*, 2018, pp. 457–461.
- [32] A. Triantafyllou, D. C. Tsouros, P. Sarigiannidis, and S. Bibi, “An architecture model for smart farming,” in *Proceedings - 15th Annual International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2019*, 2019, pp. 385–392.

- [33] O. JiHye, D.-H. Noh, and Y.-H. Sohn, "Empirical test of Wi-Fi environment stability for smart farm platform," in *Proceedings of the 2017 4th International Conference on Computer Applications and Information Processing Technology, CAIPT 2017*, 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–5.
- [34] "Arduino - Introduction." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [35] "Arduino Uno a fondo. Mapa de pines | Aprendiendo Arduino." [Online]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/06/27/arduino-uno-a-fondo-mapa-de-pines-2/>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [36] M. Gonçalo and Pitarma Rui, "Agricultural environment monitoring system using wireless sensor networks and IoT," *2018 13th Iber. Conf. Inf. Syst. Technol.*, 2018.
- [37] M. Vera, R. Osorio-Comparán, A. Rienzo, M. Duarte-Mermoud, and G. Lefranc, "Variables control of a modular greenhouse," in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2017 - Proceedings*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–8.
- [38] X. Bajrami and I. Murturi, "An efficient approach to monitoring environmental conditions using a wireless sensor network and NodeMCU," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 135, no. 3, pp. 294–301, Jun. 2018.
- [39] S. R. Jaffe, "Design of Inexpensive and Easy To Use DIY Internet of Things Platform," California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 2016.
- [40] SparkFun Electronics, "nRF24L01 + single chip transceiver." [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf. [Accessed: 10-Nov-2020].
- [41] N. Zhu and A. V. Vasilakos, "A generic framework for energy evaluation on wireless sensor networks," *Wirel. Networks*, vol. 22, no. 4, pp. 1199–1220, May 2016.
- [42] "La aplicación de sistemas de protección garantiza la disposición de frutas y

verduras todo el año | Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria | Gobierno | gov.mx.” [Online]. Available: <https://www.gob.mx/senasica/articulos/conoce-que-es-la-agricultura-protegida?idiom=es>. [Accessed: 24-Sep-2019].

- [43] P. JUAREZ LOPEZ *et al.*, “Repositorio Institucional ARAMARA: ESTRUCTURAS UTILIZADAS EN LA AGRICULTURA PROTEGIDA.” [Online]. Available: <http://dspace.uan.mx:8080/handle/123456789/567>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [44] ICARDA, “Protected agriculture | ICARDA.” [Online]. Available: <https://www.icarda.org/research/innovations/protected-agriculture#targetText=Protected agriculture – the cultivation of,traditional cropping is not viable>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [45] J. J. Estrada Paredes, “Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos,” 2012. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/as968s/as968s.pdf>. [Accessed: 20-Mar-2021].
- [46] R. Castro Usbeika, H. Jaminson, F. Manco, and J. Vásquez Morera, “7. CAPÍTULO I ARTÍCULO La agricultura protegida de pequeña escala como una alternativa de producción agrícola y seguridad alimentaria para la zona de Somoto, Nicaragua.”
- [47] G. Banco De Patentes, L. Antonio Silva Rubio -Coordinador Andrea, and B. Huertas, “SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO.”
- [48] Novagric, “Ventajas de la Producción en Invernaderos,” 2015. [Online]. Available: <http://www.novagric.com/es/blog/articulos/ventajas-de-la-produccion-en-invernaderos>. [Accessed: 09-Mar-2019].
- [49] DANE, “El cultivo del tomate de mesa bajo invernadero, tecnología que ofrece mayor producción, calidad e inocuidad del producto,” 2014.
- [50] D. M. Olea Suárez, “Estrategia Tecnológica para la Productividad y la Competitividad en el Marco de la Globalización.”
- [51] FAO, “Prioridad mundial al consumo de fruta y hortalizas,” 2003. [Online]. Available: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/fruitveg1.htm>. [Accessed: 13-Mar-2020].

- [52] DANE, “Boletín mensual INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA.”
- [53] Sioc.minagricultura, “Hortalizas.” .
- [54] DANE, “Encuesta nacional agropecuaria (ENA),” Jun-2020. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>. [Accessed: 22-Oct-2020].
- [55] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, “SECTOR HORTÍCOLA COLOMBIANO-2015.”
- [56] Gobernación de Cundinamarca, “PLAN DE DESARROLLO CUNDINAMARCA 2016-2020,” *Gobernación de Cundinamarca*. [Online]. Available: <http://www.cundinamarca.gov.co:10039/wcm/connect/2a9dd7d1-d693-414a-94cd-37fe5f901e7d/PLAN+DE+DESARROLLO+VERSION+FINAL.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IDIW39U>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [57] N. S. TOLEDO BURGOS, “PROTOTIPO BASADO EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS (WSN) PARA EL APOYO DE CULTIVOS EXPERIMENTALES EN LA GRANJA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS – SENVARA,” 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/001/1144/1/RUNILLANOS SIS 0308 PROTOTIPO BASADO EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS %28WSN%29 PARA EL APOYO DE CULTIVOS EXPERIMENTALES EN LA GRANJA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS – SENVARA %28Sensores de Vari>. [Accessed: 10-Apr-2021].
- [58] J. Gómez and N. S. Sandoval, “Revista digital de Semilleros de Investigación REDSI DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN WEB PARA REGISTRAR LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SUELO, OBTENIDOS POR UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS, UTILIZANDO EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION,” 2018.
- [59] “Las 5 claves para ser exitoso en el cultivo del tomate - Crop Science

- Colombia.” [Online]. Available: <https://www.cropscience.bayer.co/Centro-de-Noticias/Noticias/2018/09/Las-cinco-claves-tomate.aspx>. [Accessed: 24-Sep-2019].
- [60] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, “Tomate_2017,” 2019. [Online]. Available: https://www.agronet.gov.co/Documents/9-TOMATE_2017.pdf. [Accessed: 18-Mar-2021].
- [61] Asohofrucol, “ASOHOFrucOL - Hortalizas.” [Online]. Available: http://www.asohofrucol.com.co/hortaliza_detalle.php?id=127. [Accessed: 18-Mar-2021].
- [62] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, “Habichuela_2017,” 2019. [Online]. Available: https://www.agronet.gov.co/Documents/16-HABICHUELA_2017.pdf. [Accessed: 18-Mar-2021].
- [63] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, “CADENA DE HORTALIZAS Indicadores e Instrumentos,” 2018. [Online]. Available: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Hortalizas/Documentos/2018-02-28 Cifras Sectoriales.pdf>. [Accessed: 12-Apr-2020].
- [64] L. R. Escobar Hugo, “Manual de Producción de Tomate Bajo Invernadero,” 2009.
- [65] D. Camejo, P. Rodríguez, M. A. Morales, J. M. Dell’Amico, A. Torrecillas, and J. J. Alarcón, “High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility,” *J. Plant Physiol.*, vol. 162, no. 3, pp. 281–289, Mar. 2005.
- [66] N. Bustamante, J. F. Acuña, and D. Valera, “Effect of greenhouse heights on the production of aromatic herbs in Colombia. Part 1: Chives (*Allium schoenoprasum* L.),” *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol. 10, no. 1, pp. 113–124, Jul. 2016.
- [67] R. Gil, C. R. Bojacá, and M. Á. Rodríguez, “Adaptación de un modelo de duración de humedad de hoja para tomate bajo invernadero en Colombia,” *Agron. Colomb.*, vol. 33, no. 1, pp. 11–19, Jan. 2015.

- [68] J. Cuéllar, J. Cuéllar, A. Cooman, and H. Arjona, "Incremento de la productividad del cultivo de tomate bajo invernadero mejorando la polinización," *Agron. Colomb.*, vol. 18, no. 1–3, pp. 39–45, Jan. 2001.
- [69] I. M. Paredes, P. Del, C. I. Mauricio, R. M. Cueva, and N. G. S. Orozco, "MONITOREO Y CONTROL DE TEMPERATURA AMBIENTAL Y HUMEDAD DEL SUELO EN UN INVERNADERO DE TOMATE RIÑÓN, UTILIZANDO COMUNICACIÓN INALÁMBRICA Escuela Politécnica Nacional Quito-Ecuador."
- [70] J. Gajc-Wolska and A. Korzeniewska, "J. Benton Jones Jr: Tomato plant. Culture in the field, greenhouse, and home garden," *Acta Physiol. Plant.*, vol. 31, no. 2, pp. 425–426, Mar. 2009.
- [71] S. Saigua Carvajal, M. Villafuerte Haro, D. Ávila Pesantez, and A. Arellano, "Evaluación de las topologías físicas de redes WSN para la medición de variables ambientales," *Rev. Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 3, no. 1, pp. 159–165, Dec. 2015.